

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2013



J. CRAMER Verlag · Braunschweig
2014

Das vorliegende Jahrbuch ist bei der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft
und im Buchhandel erhältlich

Preis: € 20,00

Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Fallersleber-Tor-Wall 16 · D-38100 Braunschweig
Postfach 3329 · D-38023 Braunschweig
Telefon: (05 31) 1 44 66 · Fax (05 31) 1 44 60

<http://www.bwg-nds.de>

Für die Redaktion verantwortlich:
Dietmar Brandes

ISSN 0931-1734

ISBN 978-3-934656-33-8

Gesamtherstellung:

J. Cramer Verlag · Haarsweg 1 · D-38126 Braunschweig
2014

Printed in Germany

INHALTSVERZEICHNIS

Organe der BWG.....	9
---------------------	---

PLENARVERSAMMLUNGEN

19.01.2013	in Braunschweig <i>Dietmar Schomburg</i> : Computerbiologie – die Welt der großen Zahlen und Moleküle.....	11
	<i>Klaus Gahl</i> : Schlussworte zur Neujahrssitzung der BWG.....	18
08.02.2013	in Braunschweig <i>Gunter Kühne</i> : Israel und die (amerikanisch-) jüdische Diaspora – Einheit oder Entfremdung (Ausführliche Fassung: siehe Rubrik Abhandlungen in diesem Jahrbuch).....	271
08.03.2013	in Braunschweig <i>Claus-Artur Scheier</i> : Herkunft und Gegenwart des Denkens in Modellen.....	20
	<i>Christel C. Müller-Goymann</i> : Epithelmodelle als Ersatz für Tierversuche in der Arzneimittelzulassung.....	26
	<i>Peter Wriggers</i> : Mehrskalige Modellbildung als Ersatz für tierversuche in der Arzneimittelzulassung	
12.04.2013	in Braunschweig <i>F. Jochen Litterst</i> : Higgs-Teilchen und vieles mehr – wozu dient der LHC?.....	32
14.06.2013	Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik <i>Rolf Radespiel</i> : Campus Forschungsflughafen – Status und Perspektiven	
11.07.2013	Goslar, Energie-Forschungszentrum Niedersachsen <i>Hans-Peter Beck</i> : Transdisziplinäre Energieforschung und Energiewende – Der Beitrag des EFZN.....	33

11.10.2013	in Braunschweig <i>Otto Luchterhandt: Modelle und Typen in der Rechtswissenschaft.....</i>	61
	<i>Otto Richter: Multiphysik-Ansätze in der Biologie.....</i>	77
	<i>Christian Müller-Schloer: trusted Communities – Social Metaphors for Technical Systems.....</i>	95
08.11.2013	in Hannover <i>Franz-Erich Wolter: Virtuelle Realität und Haptik.....</i>	98
13.12.2013	in Braunschweig Haupt- und Wahlsitzung	

KLASSENSITZUNGEN

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

08.02.2013	in Braunschweig <i>Antje Schwalb: Klima- und Umweltberichte aus der Tiefe von Seen.....</i>	100
08.03.2013	in Braunschweig <i>Regularien</i>	
12.04.2013	in Braunschweig <i>Reinhard F. Werner: Kann man messen, ob eine Zahl rational ist? – Ausbreitung und Spektrum in einem einfachen Quantensystem.....</i>	104
11.10.2013	in Braunschweig <i>Regularien</i>	

Klasse für Ingenieurwissenschaften

08.02.2013	in Braunschweig <i>Jürgen Müller: Testing Relativity by Lunar Laser Ranging.....</i>	105
------------	---	-----

12.04.2013	in Braunschweig <i>Manfred Krafczyk: Zur Modellierung und Simulation von Turbulenz.....</i>	107
14.06.2013	in Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik, Campus Forschungsflughafen <i>Regularien</i>	
11.10.2013	in Braunschweig <i>Regularien</i>	
13.12.2013	in Braunschweig <i>Regularien</i>	

Klasse für Geisteswissenschaften

08.02.2013	in Braunschweig <i>Werner Lehfeldt: Ferdinand des Saussure</i>	
12.04.2013	in Braunschweig <i>Joachim Hentze: Nachhaltigkeitsberichterstattung.....</i>	115
14.06.2013	in Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik, Campus Forschungsflughafen <i>Regularien</i>	
13.12.2013	in Braunschweig <i>Regularien</i>	

FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG am 26. April 2013

Carl Friedrich Gauß-Kolloquium

„Ingenieurwissenschaften und Medizintechnik – Die Strömungsmechanik im interdisziplinären Kontext“

Thomas Schmitz-Rode, Aachen

Computergestützte Modellierung in der kardiovaskulären Medizintechnik... 125

Roberto Verzicco, Rom

Dynamics of the aortic root functional unit using Direct Numerical Simulation..... 130

Wolfgang A. Wall

Die Lunge – Die Kunst der ingenieurmäßigen Modellbildung und deren Nutzen/
Potenzial

Festversammlung im Altstadtrathaus

Der Präsident der BWG, *Joachim Klein*

Begrüßung und Bericht..... 148

Rolf Radespiel, Braunschweig

Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 2013 an *Prof.
Dr.-Ing. Wolfgang Schröder, RWTH Aachen*..... 156

Wolfgang Schröder

Human Computational Fluid Dynamics: From the Nose Model to the Real
Nose..... 160

Urkunde und Lebenslauf des Preisträgers..... 187

Der Vizepräsident der BWG, *Klaus Gahl*

Schlusswort zur Jahresversammlung der BWG..... 189

HINWIESE AUF ÖFFENTLICHE VERANSTALTUNGEN DER BWG

10., 17.01., 07., 14. und 21.02.2013 phaeno Wolfsburg

Vortragsreihe „*Licht*“ 191

05.02., 17.04., 11.06. Roter Saal, Schloss Braunschweig

Akademie-Vorlesungen „*Phänomen Raum*“ 195

31.05.2013 Institut für Braunschweigische Regionalgeschichte

Regionalgeschichtliches Symposium: *Bildung und Kultur –
Carl I.: Politik der Nachhaltigkeit im Zeitalter der Aufklärung*... 198

19.06.2013 Raum Veolia, Haus der Wissenschaft, Braunschweig

9. Bioethik-Symposium „*Infektionsmedizin der Zukunft – He-
rausforderung für Individuum und Gesellschaft*“ 200

Klaus Gahl: Bericht zum 9. Bioethik-Symposium..... 202

26.09., 24.10., 07. und 14.11.2013 phaeno Wolfsburg	
Vortragsreihe „ <i>MathematikXAnders</i> “.....	212

06./07.10.2013 Leibnizhaus, Hannover	
<i>First Conference of Scientific-Cooperation between Lower Saxony and Israel</i>	216

29.11.2013 Akademiesaal, Aulagebäude am Wilhelmsplatz, Universität Göttingen	
<i>Gemeinsame Sitzung Akademie der Wissenschaften zu Göttingen und Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft</i>	

AKADEMISCHE FEIERSTUNDE „70 JAHRE BWG“

Programm.....	220
---------------	-----

Ansprache des Präsidenten der BWG, <i>Joachim Klein</i> , zur Akademische Feierstunde am 27.11.2013 im Neuen Senatssaal der TU Braunschweig.....	221
--	-----

Schlussworte von <i>Dietmar Brandes</i>	224
---	-----

ABHANDLUNGEN

<i>Sigurd Falk</i> : Ein Beitrag zur Numerik von Polynomen und Polynommatrizen...	227
---	-----

<i>Dieter Kind</i> : Erwin Marx und sein Beitrag zur Entwicklung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung von 1930 bis 1945.....	254
--	-----

<i>Gunther Kühne</i> : Israel und die (amerikanisch-)jüdische Diaspora – Einheit oder Entfremdung?.....	271
---	-----

MITTEILUNGEN

Veröffentlichungen.....	290
-------------------------	-----

Geschäftliche Mitteilungen.....	290
---------------------------------	-----

PERSONALIA

Todesfälle.....	291
Nachrufe.....	292
Zuwahlen.....	297

Die Organe der BWG 1943–2013

Konstituierende Sitzung:	30.11.1943	
Eröffnungssitzung:	09.12.1943	[siehe Abhandlungen der BWG 21 (1969), 8]
Erste Sitzung:	1944	[siehe Abhandlungen der BWG 1 (1949), 169]
Zweite Sitzung:	1953	[siehe Abhandlungen der BWG 5 (1953), 212]
Dritte Sitzung:	1971	[siehe Abhandlungen der BWG 22 (1970), 291]
Vierte Sitzung:	1993	[siehe Jahrbuch der BWG (2007), 10]
Fünfte Sitzung:	2008	[siehe Jahrbuch der BWG (2008), 10 ff.]
Sechste Sitzung:	2010	[www.bwg-nds.de/über-die-bwg/satzung]

Präsidenten

1943–45: Fritz Gerstenberg; 1946–48: Gustav Gassner; 1949–50: Hans Herloff Inhoffen; 1951–53: Eduard Justi; 1954–56: Leo Pungs; 1957–59: Max Kohler; 1960–62: Hans Kroepelin; 1963–66: Paul Koeßler; 1967–70: Hermann Blenk; 1971–77: Karl Gerke; 1978–80: Herbert Wilhelm; 1981–86: Karl Heinrich Olsen; 1987–92: Gerhard Oberbeck; 1993–95: Werner Leonhard; 1996–1999: Norbert Kamp; seit 2000: Joachim Klein

Generalsekretäre

1943–45: Ernst August Roloff; 1946–48: Wilhelm Gehlhoff; 1949–50: Eduard Justi; 1951–53: Hermann Schlichting; 1954–1959: Hans Herloff Inhoffen; 1960–61: Hellmut Bodemüller; 1962–64: Hans Joachim Bogen; 1965–69: Hermann Schaefer; 1970–71: Karl Gerke; 1972–73: Arnold Beuermann; 1974–80: Karl Heinrich Olsen; 1981–82: Ulrich Wannagat; 1983–85: Hans Joachim Kanold; 1986–88: Egon Richter; 1989–91: Harmen Thies; 1992–94: Ulrich Wannagat; 1995–97: Helmut Braß; 1998–2000: Elmar Steck; 2001–2010: Claus-Artur Scheier

Vizepräsidenten

2011–2012: Claus-Artur Scheier; seit 2011: Klaus P.G. Gahl; seit 2013: Dietmar Brandes

Vorsitzende der Klassen

BIS 1954 SEKRETÄRE DER ABTEILUNGEN

Mathematik und Naturwissenschaften

1943–47: G. Cario; 1948–50: P. Dorn; 1951–53: H.H. Inhoffen; 1954–57: P. Dorn; 1958–60: H. Kroepelin; 1961: H. Poser; 1962–64: H. Hartmann; 1965–66: H. Schumann; 1967–72: M. Grützmaker; 1973–76: U. Wannagat; 1977–80: H.R. Müller; 1981–84: E. Richter; 1985–89: O. Rosenbach; 1990–91: St. Schottlaender; 1992–94: H.-J. Kowalsky; 1995–97: H. Tietz; 1998–1999: K. Schügerl; 2000: G. Müller; 2001–2003: J. Heidberg; 2004–2006: E. Winterfeldt; 2007–2012: Th. Hartmann; seit 2013: H.-D. Ehrich

Ingenieurwissenschaften

1943–48: E. Marx; 1949–53: L. Pungs; 1954–56: O. Flachsbar; 1957–60: W. Hofmann; 1961–64: H. Hausen; 1965–70: G. Wassermann; 1971–77: H.W. Hennicke; 1978–79: Th. Rummel; 1980–83: M. Mitschke; 1984–93: R. Jeschar; 1994–96: H.-G. Unger; 1997–2000: E. Stein; 2001–2005: M. Lindmayer; 2006–2008: P. Wriggers; 2009–2011: U. Peil; seit 2012: J. Müller

Bauwissenschaften

1943–44: E. Herzig; 1944–48: J. Petersen; 1949–53: Th. Kristen; 1954–62: F. Zimmermann; 1963–67: A. Pflüger; 1968–69: J. Göderitz; 1970–73: W. Wortmann; 1974: K.H. Olsen; 1975–78: H. Duddeck; 1979–83: W. Höpcke; 1984–93: J. Herrenberger; seit 1994: vereinigt mit der Klasse für Ingenieurwissenschaften

Geisteswissenschaften

1943–48: W. Jesse; 1949–53: W. Gehlhoff; 1954–57 (Obmann): W. Jesse; 1958–61 (Obmann): H. Glockner; 1962–68 (Obmann): H. Heffter; 1969–78: A. Beuermann; 1979–87: M. Gosebruch; 1988–89: H. Boeder; 1990–91: G. Maurach; 1992–1998: C.-A. Scheier; 1999: G. Maurach; 2000: C.-A. Scheier; 2001–2010: H.-J. Behr; seit 2011: K. Alpers

Plenarsitzungen

Computerbiologie – die Welt der großen Zahlen und Moleküle*

DIETMAR SCHOMBURG

Institut für Biochemie, Biotechnologie und Bioinformatik der TU Braunschweig
Spielmannstraße 7, D-38106 Braunschweig

Biowissenschaften – von der deskriptiven zur quantitativen/synthetischen Wissenschaft

Historisch war die Biologie mit Ausnahme der Biochemie länger als ihre Nachbardisziplinen eine deskriptive, systematisierende Wissenschaft. Im Bereich der Biochemie entwickelten sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hocheffiziente analytische Methoden, die in den letzten Jahren zu einer Explosion unseres biologischen Wissens führten. Erwähnt sei hier nur 1949 die Bestimmung der ersten Proteinsequenz, des Insulin, die Bestimmung der ersten Protein-3D-Struktur im Jahr 1958 und 1972 die Bestimmung der ersten Gensequenz. Es folgten die systematische Sammlung von Gen- und Proteinsequenzen erst in Buchform, dann in Form von Datenbanken, die Entwicklung von Rechner-basierten Sequenzvergleich und Sequenzalignment Programmen. In den letzten Jahren erleben wir eine extrem schnelle Weiterentwicklung von analytischen Methoden, die uns die Gesamtinformation über die jeweils aktuelle Zusammensetzung einer Zelle in Form von Genom, Transcriptom, Proteom, Metabolom geben.

Möglich wurde diese Entwicklung nur durch die parallel laufende schnelle Entwicklung der Computerbiologie (Bioinformatik, Systembiologie), die wiederum von der Entwicklung der Computer-Hardware abhängig war. Möglich wurde die komplette Genom- und Genfunktionsanalyse heute von mehr als 2000 Organismen, daneben die Simulation ganzer Zellen, das Design von Medikamenten und Proteinen mit neuen Eigenschaften.

Die Computerbiologie – oder Bioinformatik – befasst sich heute mit ganz verschiedenen Anwendungsfelder,

- Biologische Information, ihre Gewinnung und Integration
- Biologische Strukturen
(Metabolite, Makromoleküle, Sequenzen, 3D-Strukturen, Zellen, Organe)

* Der Vortrag wurde am 19.01.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

- Biologische Funktionen, vor allem molekularer Netze/Zellen (Regulatorische Netze, metabolische Netze, Transport)

Biowissenschaften zwischen Molekül und Organismus

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts sind die Biowissenschaften insgesamt gespalten zwischen den makroskopischen Beobachtungen, der Beobachtung des sogenannten Phänotyp, wie z.B. ein Organismus überlebt bei 90°C, eine Pflanze braucht Schatten, ein Mensch hat Fieber oder eine biotechnologische Fermentation ergibt nicht genug Produkt und den molekularen Beobachtungen, dem sogenannten Genotyp, wie eine genetische Mutation liegt vor, ein Protein wird in höheren Mengen produziert, eine bestimmte Enzymaktivität steigt, es werden Wechselwirkungen eines Proteins mit anderen Molekülen beobachtet.

Hier deutet sich konzeptionell eine Überwindung dieser Spaltung an, die mit Hilfe der Systembiologie erreichte „Genotyp – Phänotyp Korrelation“, die große Herausforderung der Lebenswissenschaften in den nächsten Jahren.

Vieles haben wir das in den letzten Jahren schon erreicht, bei den genetisch monokausalen Phänomenen, beispielsweise manche genetische Krankheiten wie Phenylketonurie, die heute oft schon verstanden und qualitativ vorhersagbar sind.

Die meisten biologischen Phänomene stellen aber multikausale und kooperative Phänomene, dar, die durch qualitative Betrachtungen nicht verständlich werden, wie z.B. die komplexen Krankheiten (Herz/Kreislauf, Krebs, Infektionen, Autoimmun-Krankheiten etc.). Hier liegen Reaktion von molekularen Netzen vor, nicht von einer oder weniger Komponenten. In dieser überwiegenden Mehrzahl der Fälle sind Modellierung und Simulation notwendig

Für diese Simulation braucht es aber eine Reihe von Voraussetzungen.

Wir brauchen genaue Kenntnis :

- Aller zellularen Komponenten
- Ihrer statischen und dynamischen Wechselwirkungen und Umwandlungen
- Der Netzwerktopologie
- Der Regulation
- Der Grenzen des Systems und der Transportwege
- Die mathematische Beschreibung und Software
- Kenntnis der physikochemischen Gesetze und Parameter sowie des jeweiligen Energiebedarfs (Kinetik und Thermodynamik).

Biologische Systeme sind groß

Allein die Anzahl der molekularen „Player“ in der Zelle zeigt, dass ein Erfassen oder gar ein Verständnis und eine Vorhersage der Vorgänge ohne Computer völlig unmöglich ist.

Die Zelle: molekulare Bestandteile der bakteriellen Zelle

	Gewichtsanteil	Zahl der Komponenten
Wasser	70%	1
DNA	1%	1
RNA	6%	>3000
Proteine	15%	3000
Lipide	2%	20
Polysaccharide	3%	5
Metabolite	2%	500–1000
Ionen	1%	20

Genome – Konstruktionszeichnungen & Produktionsanweisungen für Proteine

Die Mikroorganismen mit dem kleinsten Genom tragen ca. 600 000 Buchstaben („Basenpaare“), die für ca. 500 Gene kodieren, dies entspricht d.h. ca. 300 Seiten Text in einem Buch. Die normalen und häufigen Bakterien schon ca. 3–20 Millionen Buchstaben, die für 3000–20 000 Gene bzw. Proteine kodieren, d.h. ca. 3–20 Bücher mit je 500 Seiten Text, der Mensch hat ca. 3 Milliarden Buchstaben und ca. 25 000 Gene, d.h. ca. 3000 Bücher mit je 500 Seiten Text.

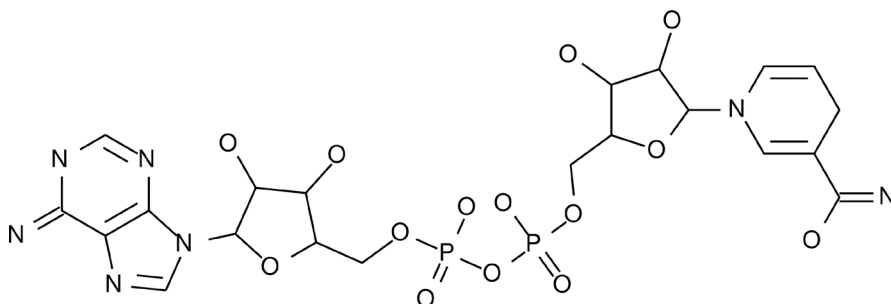
Manche anderen Organismen benötigen aber sehr viel mehr genetisches Material als der Mensch, so die Tulpe mit ca. 120 Milliarden Buchstaben, dies entspricht ca. 4 km Bücher nebeneinandergestellt oder der südamerikanische Lungenfisch mit ca. 784 Milliarden Buchstaben, d.h. ca. 25 km Bücher. Aber auch winzige Einzeller, z.B. die Amöbe *Amoeba dubia* mit ca. 670 Milliarden Buchstaben, ca. 22 km Bücher, schlägt den Menschen bei weitem.

DNA, Kohlenhydrate, Proteine und Metabolite – Funktionen dank definierter chemischer und Raumstrukturen

Während die Genome in ihrer Funktion eindimensional kodiert sind, definiert sich biologische Funktion der meisten Moleküle durch ihre Raumstruktur und die elektrostatischen Eigenschaften ihrer Oberfläche. Im Computer übersetzt in

entsprechende Kodierungen, wie z.B. der InChi-Code, buchstabenbasierte Gen- oder Proteinsequenz und die Koordiniertenbaierte Protein 3D-Struktur.

Als Beispiel sei hier NADH als chemische Strukturformel und in der Computerlesbaren Form als InChi (International Chemical Identifier) dargestellt.



InChI=1S/C21H29N7O14P2/c22-17-12-19(25-7-24-17)28(8-26-12)21-16(32)14(30)11(41-21)6-39-44(36,37)42-43(34,35)38-5-10-13(29)15(31)20(40-10)27-3-1-2-9(4-27)18(23)33/h1,3-4,7-8,10-11,13-16,20-21,29-32H,2,5-6H2,(H2,23,33)(H,34,35)(H,36,37)(H2,22,24,25)/t10-,11-,13-,14-,15-,16-,20-,21-/m1/s1

Biologische Systeme sind dynamisch

Die Zelle reagiert zu jedem Zeitpunkt auf äußere Signale, entweder aus der Umgebung oder von anderen Zellen kommend. Dabei reagiert der Stoffwechsel am schnellsten auf die Umwelt. Daneben steht der Zelle die Möglichkeit zur Verfügung, über Regulations-Netzwerke ihr Reservoir an Proteinen optimal an die veränderte Situation anzupassen. Die kostet aber deutlich mehr Zeit und vor allem Energie, das die Zelle in Form der Hydrolyse von ATP Molekülen liefern muss. So kostet z.B. die Produktion des genetischen Materials 72 Millionen Moleküle ATP, eines Proteins 1.500, eines Polysaccharids oder eines mRNA Moleküls je 2.000 ATP Moleküle.

Molekulare Diffusionsgeschwindigkeiten in der Zelle sind deutlich herabgesetzt, so von größeren Proteinen um ca. den Faktor 10. Neben der Funktion ist auch die Lebensdauer von Molekülen in der Zelle während der Evolution optimal angepasst, so werden manche Proteine schon nach 10 Minuten, andere erst nach ca. einer Woche „recyclet“.

Die experimentellen Methoden

Diese Anpassungen und schnellen Umwandlungen in der Zelle haben wir bis vor kurzem nur am Einzelfall und in Ansätzen untersuchen können, aber die modernen

experimentellen Möglichkeiten, z.B. die Massenspektrometrie in Proteom- oder Metabolomanalysen und die modernen Sequenzierautomaten erlauben uns jetzt die Analyse, und mit der Analyse kommt das Verständnis.

Die schnellste technologische Entwicklung im Vergleich aller weltweit zur Zeit entwickelten Techniken überhaupt erlebt zur Zeit sicherlich die Genom-Sequenzieretechnik. Während die Bestimmung des ersten menschlichen Genoms im Jahr 2003 ca. 2,7 Milliarden US \$ gekostet hat, kostet die Sequenzierung des Genoms eines Menschen heute nur noch ca. 1000 \$, d.h. millionenfach weniger.

Datenbanken, in der Biologie geht nichts ohne sie

Die erwähnte technische Explosion zieht natürlich eine Explosion des in öffentlichen Biodatenbanken abgelegten Wissens nach sich. Hierzu gehören sogenannte Primärdatenbanken, in der experimentell bestimmte Information wie Sequenzen und Strukturen abgelegt werden und komplexere Datenbanken, die Biomoleküle oder Organismen beschreiben.

BRENDA – umfangreiche Datenquelle für die Biowissenschaften

Als Beispiel einer seit 25 Jahren entwickelten biologischen Datenbank sei hier das Enzym-Informationssystem BRENDA (Braunschweiger Enzymdatenbank) erwähnt. Sie enthält experimentelle Daten von mehr als 1,4 Millionen Enzymen, von denen 67 000 experimentell charakterisiert sind. Insgesamt wurden aus manuell ausgewerteten 118 000 Journal-Artikeln ca. 3,4 Millionen Daten extrahiert und strukturiert zugänglich gemacht. Die enorme Bedeutung der Datenbank für die internationale Forschungsgemeinde wird durch die monatlichen 5–7 Millionen Zugriffe von ca. 200 000 Benutzern weltweit deutlich. Die manuell aufgearbeiteten Daten werden durch Computer-basierte Textinterpretationen, sogenanntes Text-Mining, ergänzt.

Systembiologie – vorurteilsfreie Analytik & Modellierung

Im Rahmen der Systembiologie werden vorurteilsfreie Messmethoden mit rechnerbasierten Simulationsmethoden verknüpft und liefern so ein Verständnis des Verhaltens von Organismen, z.B. was erlaubt es einigen Organismen, uns zu infizieren oder bei 100°C zu leben, die Vorhersage der Reaktion des Organismus auf Änderungen in seiner Umgebung (z.B. bei Infektion oder Medikamentengabe), die Vorhersage des Verhaltens von Mutanten. Diese systembiologischen Methoden werden zur Zeit vor allem in der Grundlagenforschung, der biotechnologischen Produktoptimierung und der Medikamentenentwicklung eingesetzt.

Die verwendeten Modellierungsansätze lassen sich in die folgenden Kategorien einteilen:

- Strukturanalyse des metabolischen Netzes
 - Identifizierung von wichtigen “Umschlagplätzen” – Ansatzpunkte für Medikamente oder für biotechnologische Produktbildung.
- Stöchiometrische Modellierung
 - Berechnung der metabolischen Kapazitäten und stabiler metabolischer Zustände in Zellen und Organen
 - Vorhersage von Stoffflüssen in einem gegebenen Umfeld und einem bestimmten Protein-Repertoire
 - Analyse der Lebensfähigkeit und Widerstandsfähigkeit
- Kinetische Modellierung
 - Zeitabhängige Reaktionen der Zelle auf äußere Veränderungen

Die Modellerstellung ist momentan noch sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv. Man geht dabei im Normalfall von einem sequenzierten Genom aus, sagt die biologischen Funktionen der Gene voraus, addiert bei einem metabolischen Netz die chemischen Reaktionen der Enzyme, Transportvorgänge und Energiebilanzen und testet dann die aus dem Modell berechneten Vorhersagen und Hypothesen des Modells am Experiment. Jedes dieser Modelle durchläuft dann eine Reihe von experimentell definierten Optimierungszyklen.

Während die kinetische Modellierung für absehbare Zeit noch an dem Fehlen von Zehntausenden kinetischer Enzymkonstanten nur für sehr kleine Systeme denkbar ist, ist die stöchiometrische Modellierung heute „state of the art“.

$$\frac{dc_1}{dt} = \sum_i S_{i1} \cdot v_i - b_1 = 0$$

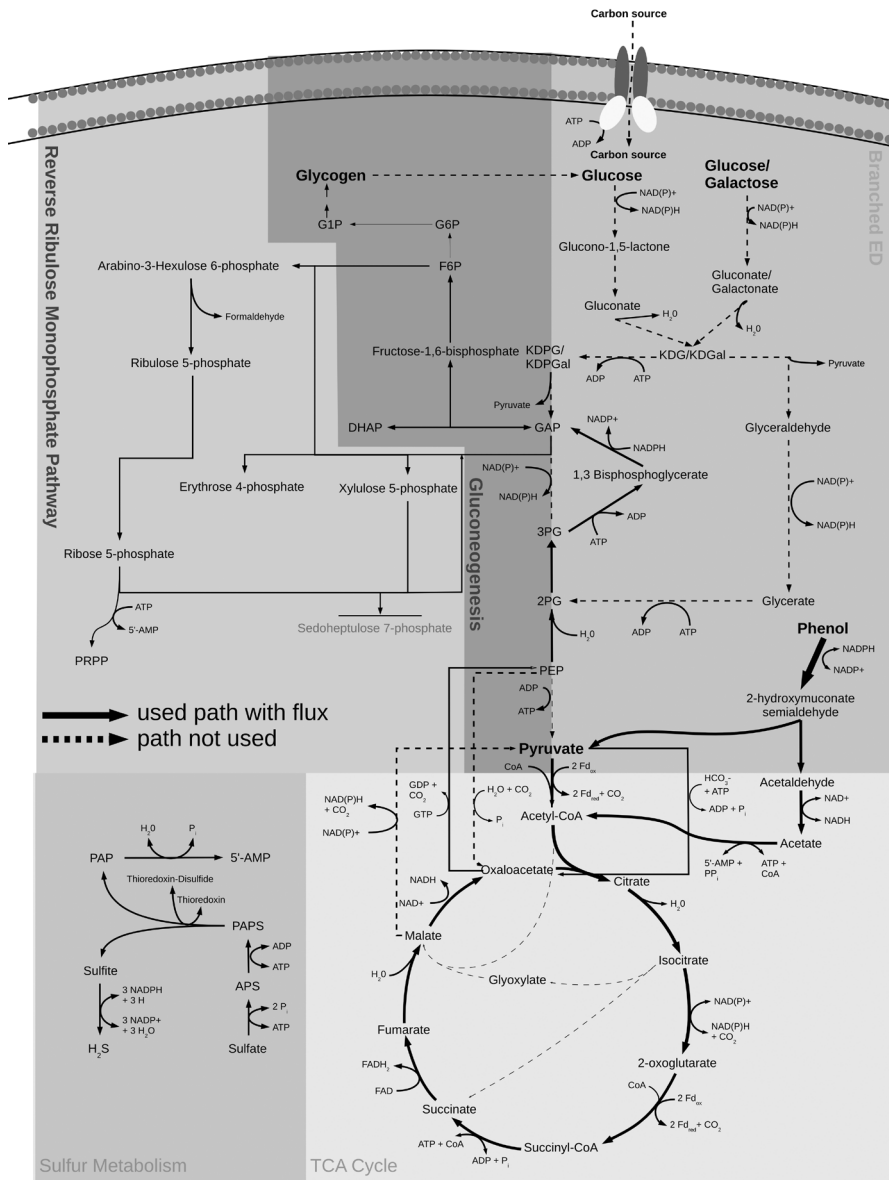
$$\frac{dc_2}{dt} = \sum_i S_{i2} \cdot v_i - b_2 = 0$$

...

$$\frac{dc_N}{dt} = \sum_i S_{iN} \cdot v_i - b_N = 0$$

Sie beruht auf der Aufstellung von partiellen Differentialgleichungen für jede Komponente der Zelle, Wenn es wie in vielen Fällen um die Modellierung stabiler Zustände geht, vereinfacht sich das System, wie oben gezeigt, zu einem – unterbestimmten – linearen Gleichungssystem. Dieses kann unter Zuhilfenahme von Zusatzannahmen, wie z.B. dass der Organismus während der Evolution in Richtung auf effiziente Nutzung der Nahrungsquellen optimiert wurde, gelöst werden.

Als Resultat erhält man z.B. eine Vorhersage der Stoffflüsse in der Zelle, wie in der folgenden Abbildung für *Sulfolobus solfataricus*, ein thermostabiles Archaeon, und Phenolabbau gezeigt.



Schlusswort zur Neujahrssitzung der BWG am 19.01.2013

KLAUS P. G. GAHL

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

alles Leben äußert sich in Selbstbewegung, Selbsterhaltung und Selbstverwirklichung. Wie komplex die Realisierung dieser Grundvollzüge des Lebens ist, hat uns Herr Schomburg in faszinierender Weise gezeigt: nicht nur in der packenden Art seiner Darstellung sondern auch faszinierend in dem, was er uns vor Augen gestellt hat. Dafür herzlichen Dank!

Es ist uns allen deutlich geworden, wie sehr verflochten bereits auf der Ebene niederer Lebewesen die Vorgänge von Bewegung, Erhaltung und Verwirklichung sind, und wie viel komplexer auf der höheren Ebene des Zusammenspiels der Organe und des Gesamtorganismus in und mit der Umwelt. Reichen bio-kybernetische Modelle von Rückkoppelung und Regelkreisen, von Fließgleichgewichten und multikausalen Aktionen und Reaktionen aus, um Leben zu erklären? Der Blick auf die dynamische Morphologie und auf die Vielfalt situativ wechselnder Funktionen eines auf sich selbst konzentrierten Organismus – sei es ein Einzeller oder der Mensch – mehr noch der Blick auf seine Begegnung (um nicht zu sagen Auseinandersetzung) und wechselseitige Abhängigkeit mit bzw. von den „Außenbedingungen“ macht klar, dass auch hier „das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile“. Vor allem mehr als die Summe quantifizierbarer und physikalisch messbarer Daten. Auch das ist aus Herrn Schomburgs Vortrag eindrucksvoll spürbar geworden.

Auf die genannte Charakterisierung von Leben als Selbstbewegung, Selbsterhaltung und Selbstverwirklichung zurückkommend, ist die unterschiedliche Bedeutung dieses „Selbst“ der Begriffe zu bedenken:

- In Selbst-Bewegung ist die Spontaneität, die mögliche Eigenmächtigkeit von Orts- oder Entwicklungsbewegung angesprochen;
- in Selbst-Erhaltung die individuell- und art-konstante Kontinuität des Lebens, das sich selbst gebiert;
- in der Selbst-Verwirklichung das Leben, das als Leben leben will (so Albert Schweitzer); für den Menschen steckt in der Selbstverwirklichung zugleich die reflexive und kommunikative Zielsetzung eigenen und gemeinschaftlichen Lebens.

In allem geht es um das Leben als solches, um das Leben um des Lebens willen, das sich mit der Arbeitsmethodik des Computers kaum erfassen lässt. Es bleibt größtenteils Geheimnis:

- der Erlebnisraum von Freude und Trauer, von Lust und Leid,
- der Raum der Intersubjektivität von Achtung und Liebe, von emotionaler und rationaler Kommunikation;
- der Raum von Hoffnung und Glaube.

Nehmen wir die skizzierten drei Lebensaktivitäten mit in das neue Jahr:

- halten wir uns (1.) bei aller notwendigen sorgenden Zukunftsplanung offen für Spontaneität, für Kreativität und Freiheit;
- achten wir (2.) auf die dem Leben eignende Kraft der Selbsterhaltung, dass das uns anvertraute Leben hier und weltweit Bestand haben möge;
- und mögen wir (3.) unser Leben so führen können, dass wir im Bewusstsein mitmenschlicher Gegenseitigkeit und Solidarität das uns Mögliche beitragen zum Frieden in der Welt.

Mit herzlichen Wünschen für ein gesundes, frohes neues Jahr darf ich Sie, verehrte Damen und Herren, nun im Namen der BWG zum Neujahrsempfang in unseren Räumen am Fallersleber Torwall freundlich einladen.

Herkunft und Gegenwart des Denkens in Modellen*

CLAUS-ARTUR SCHEIER

Jasperallee 67, D-38102 Braunschweig

Im Rückblick erstaunlich schnell entsprang wissenschaftliches Denken um die Mitte des ersten vorchristlichen Jahrtausends der Transformation des *mythos*, der Erzählung, in den *lógos*, das Urteil (subjektiv die „Aussage“, „Feststellung“, „Behauptung“) – auch auf die inzwischen globalen Folgen gesehen eine weltgeschichtliche Innovation mit dem markanten Profil eines autopoietischen Systems. Zunächst brachte diese Revolution der Denkart für die

- *Zeit des Wissens*

den Primat der Synchronie über die Diachronie, für die eigne

- *Institutionalisierung*

den Primat der Polis, des Stadtstaats, über die Theokratie und für die

- *Verfassung des Wissens*

den Primat der Anschauung über das Hören. Synchronie ist ein räumliches Verhältnis und also *maßhaft*: qualitativ-quantitativ. So sind

- *Anschaulichkeit*,

mithin unprivilegierte Erfahrbarkeit, und

- *Mathematizität*

die beiden Parameter der frühen Wissenschaft; der dritte ist ihr

- *Modellcharakter*.

Er kommt ins Spiel durch die Phänomenalität ihres unmittelbar anschaulichen Gegenstands, der *phýsis*, Natur, in ihrer durchgängigen Bewegtheit. Die Anschauung drängt auf die gänzliche Entzeitlichung der Sache, weshalb dem frühen wissenschaftlichen Denken der Unterschied von Werden und Sein bedeutsam wird – den Pythagoreern wird alles zur Zahl, und Pythagoras war es nach glaubwürdiger Überlieferung auch, der das All („alle“ – *tà pánta*) zuerst *kósmos* nannte.

* Überarbeitete Fassung des Vortrags: Die versammelte Klugheit der Zeit – philosophiegeschichtliche Bemerkungen zum Modellcharakter von Innovation, in: Antje Gimmmler, Harkus Holzinger, Lothar Knopp (Hg.): Vernunft und Innovation. Über das alte Vorurteil für das Neue. Festschrift für Walther Ch. Zimmerli zum 65. Geb., München 2010, S. 19–28.

Zur Sprache gebracht wurde der Modellcharakter des kosmologischen Wissens zuerst von Parmenides um 480 v. Chr. Die antike Philosophiegeschichtsschreibung, die in „Schulen“ dachte, hat Xenophanes zu seinem Lehrer gemacht, und in der Tat gibt es eine sachliche Anknüpfung. Daß die Kosmologien des sechsten vorchristlichen Jahrhunderts trotz ihrer Anschaulichkeit immer noch nicht vollständig vom alten Mythos abgelöst waren, konnte offenbar erst dann aufdringlich werden, als sich im kosmologischen Wissen selbst das Bedürfnis nach einem Kriterium, einem *Grund* des Wissens als Wissen, fühlbar machte, d. h. sobald mehrere Kosmologien miteinander konkurrierten. Dies ging zuerst dem weit herumgekommenen Xenophanes auf. Er war natürlich kein Monotheist, aber er lehrte über allen Göttern den *Einen*, anders als der epische Zeus nicht mehr vorstellbaren Gott, der reine ebenso vernehmende wie bewegende Vernunft (*noein*) ist. Was er vernimmt und bewegt, das All, kann kein Mensch wissen, nämlich „gesehen haben“ (*eidénai*), und auch, wenn einer die Wahrheit auf vollkommene Weise zur Sprache brächte, könnte er dies nicht wissen, eben weil ihm das Kriterium für ein solches Wissen fehlt. So lautet Xenophanes' Verdikt über das „weltliche“ Wissen:

DOKOS d'epì pàsi tétyktai. (B 34.4)
 „Schein(meinen) haftet an allem“ (Diels) =
 Ein Balken ist über dem All verlegt.

Noch wurde ohne Akzente geschrieben. Diesen Balken also, *dokós*, nämlich das menschliche Auffassen, *dókos*, das kein Wissen ist, hebt in der Einleitung von Parmenides' Gedicht die Dike (die „Zeigerin“) weg und läßt das denkende Ich in den Ort des Wissens auffahren als in den Ort der reinen Identität-mit-sich, den „Äther“. Hier vernimmt das Ich eine andre Göttin (*theá*), die keinen Namen braucht, weil sie selber spricht als das, was sie ist, nämlich nicht nur als Zeigerin, sondern als die Schau selbst, *théa*, als die erscheinende *theôria*. Sie lehrt das denkende Ich die Voraussetzung allen Wissens, die reine *Identität*, das Eine oder das Sein. Traditionellerweise unterscheidet man diesen ersten Hauptteil des Gedichts vom folgenden als den sogenannten *Alêtheia*- vom (nur sehr bruchstückhaft erhaltenen) *Dóxa*-Teil. Darin gibt Parmenides wie schon seine Vorgänger eine vollständige Kosmologie. Sie ruht allerdings nicht länger auf dem Schein eines „verlässlichen Urteils“, sondern ist selber ein *kósmos*, nämlich von Worten – und diese Erzählung ist „beirrend“ wie die alten Mythen. Das ist oft dahingehend mißverstanden worden, daß Parmenides die sichtbare Welt zum bloßen Schein erklärt habe – aber dafür mußten erst die zenonischen Paradoxien, die Sophistik und Melissos kommen.

Daß dem nicht so ist, daß von Parmenides in kritischer Absicht vielmehr *Schein* und *Erscheinung* unterschieden werden, ergibt sich aus dem Finale des *Alêtheia*-Teils:

tón soi egô diákosmon eoikóta pánta phatízô,
hôs oy mê poté tís se brotôn gnômê parelássêi. (B 8.60 f.)

Dieser mannigfaltige Kosmos, sage ich dir, ist dem All gemäß,
So daß dich keine Kenntnis von Sterblichen je übertreffen kann.

Warum nicht? Weil dies Modell verfügt ist im Blick auf ein unübertreffliches Vorbild, mit Platon: *parádeigma*, nämlich die reine Identität des Seins. Zu ihr verhält sich die angeschaute Welt wie eine (von *unserem* Erkennen gezogene) Peripherie zum unsichtbaren Zentrum, das als solches – einfache Grenze der Zeit, einfache Grenze des Raums – „*uno intuitu*“, d.h. rein zu wissen ist. Um dieses Verhältnisses willen hat zuerst Parmenides auch die Kugelgestalt der Erde wie der Welt behauptet, im Modell – wie er weiß. In dieser anschaulichen *Lichtkugel*, *sphaera lucis* (Robert Grosseteste, + 1253), ist die *Erdkugel* der dunkle Punkt, ein Konzept, das bekanntlich in Geltung bleibt bis zur Renaissance und am modernen „Beobachterstandpunkt“ sein systemtheoretisches Analogon erhalten wird.

Parmenides nun differenziert die Welt von ihrer lichten Peripherie bis zum lichtlosen Mittelpunkt graduell im Sinn einer „Verdünnungsreihe“ des Äthers und entdeckt damit die *Negation als Privation*. Dem entspricht eine Begriffsstruktur, der gemäß die Identitätsbeziehungen zu einem vertikal gegliederten Ganzen zusammengeschlossen sind, das das *Scheinen* des Einigeren in das Uneinigere reflektiert, aber an ihr selbst kein Übergehen zuläßt. Platon und Aristoteles werden diese Struktur fortschreiben, unterscheiden sich aber scharf voneinander in ihrer Stellung zum Modellcharakter des Weltbegriffs.

Während Platon mit Parmenides darauf beharrt, daß vom Kosmos letztlich kein Wissen möglich sei, weil alles in ihm ständig bewegt ist, gelingt Aristoteles eine wissenschaftlich fruchtbare Definition der Bewegung selbst, womit er zum Begründer der Naturwissenschaft im klassischen Sinn wird. So imstande, alle Vorgängermodelle einschließlich des erst ein knappes Jahrhundert alten Atomismus einer durchgreifend-begrifflichen Kritik zu unterziehen, erweist das aristotelische Modell sich als konkurrenzlos, womit der Modellcharakter von Wissenschaft überhaupt irrelevant wird. Die Natur selbst *erschließt* sich jetzt dem denkenden Anschauen. Die Wissenschaftsgeschichte erinnert dies unter dem Titel „ptolemäisches Weltbild“. Zwar bot schon im Hellenismus Epikurs revidierter Atomismus eine Alternative, die den Modellgedanken nicht vollends verloren gehen ließ, aber wissenschaftlich fruchtbar wurde er erst wieder in der Renaissance.

Jedenfalls kommt es in den drei Jahrhunderten nach Aristoteles zu einem erstaunlichen Aufblühen von Wissenschaft und Technik, um nur an Aristarch und Eratosthenes im dritten und Hipparch und Archimedes im zweiten vorchristlichen Jahrhundert zu erinnern. Mit dem Namen Aristarch ist auch die heliozentrische Hypothese verbunden, die sich seinerzeit freilich, und zwar wieder aus wissenschaftlichen Gründen (Hipparch), nicht durchsetzen konnte. Andererseits ist dies die letzte große Phase dessen, was wir Modernen ohne Schwierigkeiten als

Wissenschaft wiedererkennen, *vor* ihrer epochalen Neukonstitution in der frühen Neuzeit. Zunächst wurde sie, man kann sagen problemlos, in die Dynamik des neuplatonischen Eins (*Hén*) integriert, die dann ihrerseits in die Theologien der entstehenden monotheistischen „Weltreligionen“ übersetzt wurde.

Nach allem haben wir Heutigen wenig Grund, hier herablassend zu tun und gar vom „dunklen Mittelalter“ zu sprechen. Umgekehrt ist vielmehr daran zu erinnern, daß diese *Dynamisierung des Gedankens* (und so der Welt) die *conditio sine qua non* der Neuformierung der Naturwissenschaften in der Renaissance war, deren Impuls bis heute fortwirkt: ohne das neuzeitliche Prinzip und seine Ermöglichung der radikalen Mathematisierung der Natur keine neuzeitliche Wissenschaft. „Abgebrochen“, wie man es gelegentlich hört, wurde seinerzeit sei es durch das Imperium Romanum, sei es durch das Christentum nichts, die antike Naturwissenschaft hatte ihre äußersten Möglichkeiten sondiert, der Kreis des auf ihrem Boden Erkennbaren hatte sich vollendet, was einzelne Verbesserungen – in der Mathematik insbesondere die Übernahme der Null durch die Araber – keineswegs unmöglich machte, aber es mußte notwendig bei Verbesserungen bleiben.

Die aristotelische Naturwissenschaft verstand sich also selber nicht mehr als Modell, aber sie *hatte* eines, nämlich die *handwerkliche Produktion*. Deren Begriff war die Formierung eines Stoffs (Holz, Stein, Eisen usw.), der zwar seinerseits immer schon geformt war (Stamm, Block, Barren usw.), aber dessen Form nur das Noch-nicht, die Privation des Zwecks seiner Bearbeitung war (Brett, Säulentrommel, Klinge usw.). In der spätantik-mittelalterlichen Produktionsreihe erscheint der Stoff, ins Äußerste gedacht, darum als „fast nichts“ (*prope nihil*), aber eben immer noch als eine Spur von Form. Er ist zur absoluten Möglichkeit geworden, die Cusanus, in der Mitte des 15. Jahrhunderts, dann mit der absoluten Notwendigkeit des produktiven Weltgrunds *koinzidieren* lassen kann.

Die neuplatonische Welt-*Linie* – dieses Sich-*fast*-Verlieren der göttlichen Schöpfung ins Nichts – ist damit gerundet (*reflektiert*) zur aktuellen Unendlichkeit. Sie eigentlich ist die Idee der neuzeitlich-vorindustriellen Wissenschaftlichkeit, sinnlich anschaulich in der namentlich von Brunelleschi und Alberti in der ersten Hälfte des 15. Jahrhunderts erfundenen Zentralperspektive, die aber zu ihrer vollständigen wissenschaftlichen Beschreibung einer neuen Mathematik bedurfte, der Infinitesimalrechnung, wie sie triumphal dann das 17. Jahrhundert entwickeln wird.

Sobald die Moderne sich nun mit dem Anfang der industriellen Revolution von jener klassischen, schon als *coincidentia oppositorum* nur noch paradox („spekulativ“) zu denkenden Identität verabschiedet und an ihrer Stelle eine uneinholbare *Differenz* akzeptiert, haben ihre Welt-Modelle auch kein unhintergebares Paradigma mehr. Gleichwohl werden auch sie nach Vorbildern konstruiert, die nun

freilich nicht mehr theologisch formulierbar und darum ganz unparmenideisch ‚übertreffbar‘ sind – Denken sei Probehandeln, wußte Freud. So an ihnen selbst schlechthin *vor-läufig*, sind die modernen Modelle *Entwürfe* (wie die Revidierbarkeit das *sine qua non* positiver Wissenschaft ist). Was für Modelle sind das?

Indem Aristoteles die Bewegung exemplarisch nach dem Modell natürlich-menschlicher Produktivität, der Handarbeit dachte, könnte man wohl sagen, er sei der erste explizit technische Denker der europäischen Tradition. Indem die Neuzeit aber ihre Naturwissenschaft von Anfang an mathematisiert und mechanisiert – Dante ist der erste, der das ptolemäische Weltgebäude als eine Räder-Uhr vorstellt –, entwickelt sie auch immer komplexere mechanische Apparate, und 17. und 18. Jahrhundert sind die große Zeit der *Automaten*. Damit kommt etwas Neues ins geschichtliche Spiel. In seinen Naturmodellen reflektiert sich der Mensch, genauer sein (produktiver) Geist, sein *ingenium*, hinfort nicht mehr einfach im Produkt, sondern im *produzierenden Produkt*. Descartes zuerst spricht im Blick auf die Organismen von Automaten, Spinoza sodann vom „automa spirituale“, Leibniz vom „unkörperlichen Automaten“.

Das Denken des alten Europa stand und fiel mit seinen Begriffen der Natur als der bewegt-bewegenden Form von allem und Gottes als ihres ersten, weil unbewegten Bewegers (*primus motor* = *actus purus*). Auch die beseelten Naturprodukte sind Motoren, und das vorindustriell-neuzeitliche Denken bleibt metaphysisch, weil der Mensch, das *animal rationale* zwar Automaten, aber keine Motoren herstellen kann, was für Aristoteles den wesentlichen Unterschied von *phýsis* und *téchnê* ausgemacht hatte. Ein klassischer *Automat* ist eine mechanische Einrichtung, die ihre Funktion nach Aufhebung einer Hemmung selbständig und zwangsläufig *ausführt* (das Beispiel des 18. Jahrhunderts ist die Metallfeder); ein moderner *Motor* ist eine Maschine, die eine beliebige Energieart, z.B. Wärme oder Elektrizität, in mechanische Bewegungsenergie *umwandelt*. Ein Automat ist eine *Kraftmaschine*, ein Motor ein *Energiewandler*. Energie ist gespeicherte Arbeit, ein physikalischer Begriff erst der vierziger Jahre des 19. Jahrhunderts: Die Naturwissenschaft der frühen industriellen Moderne orientiert sich am Modell der Dampfmaschine. 1784 ließ James Watt den ersten Motor im modernen Sinn des Wortes patentieren, die doppelwirkende Niederdruck-Dampfmaschine mit Drehbewegung. Die Modelle der Moderne sind Motoren, setzen Motoren jedenfalls voraus – noch in deren medialer Form als „intelligente“ Motoren oder Rechner.

Das europäische Denken, von Anfang an Produktions- und so auch technisches Denken, interpretiert die Welt stets vom jeweils fortgeschrittensten Stand seiner Technik her. Darin gehören technisches Umdenken und Umdenken der Technik wie ihrer Welt zusammen. Freilich ist eine Genealogie solchen Modell-Denkens ihrerseits ein Modell. Wenn Lichtenberg gesagt hat: „Gesetzt der Physiognome haschte den Menschen einmal, so käme es nur auf einen bra-

ven Entschluß an sich wieder auf Jahrhunderte unbegreiflich zu machen“, dann dürfen wir verallgemeinernd sagen, es komme nur auf ein gutes Modell an, sich *auf Jahrzehnte begreiflich* zu machen – aber sobald wir etwas Besseres haben werden als den Computer, werden wir unverdrossen auch wieder von vorn anfangen. Denn zuletzt ist ein gutes Modell nichts Beliebigen: Es ist die versammelte *Klugheit* seiner Zeit.

Epithelmodelle als Ersatz für Tierversuche in der Arzneimittelzulassung*

CHRISTEL C. MÜLLER-GOYMANN

Am Rübenberg 16, D-38104 Braunschweig

Tierversuche gelten in der Forschung und Entwicklung neuer Medikamente für Mensch und Tier als unverzichtbar. Jährlich veröffentlicht das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die Anzahl von Wirbeltieren, die in Tierversuchen im Berichtszeitraum verwendet wurden (1). Die Gesamtzahl an Tieren, die in Tierversuchen und für andere wissenschaftliche Zwecke verwendet wurden, ist seit 2004 von ca. 2,3 Millionen auf ca. 2,9 Millionen bis 2011 gestiegen. Als Hauptverursacher für einen steigenden Bedarf an Wirbeltieren ist beispielsweise die biologische Grundlagenforschung zu nennen. Berücksichtigt man ausschließlich die Entwicklung neuer Medikamente für Mensch und Tier, stagniert die Zahl der Tierversuche bzw. ist seit 2009 sogar rückläufig, weil Alternativmethoden für Tierversuche zunehmend etabliert werden. Die Arzneimittelzulassung (Regulatory Acceptance) spielt dabei neben Entwicklung, Validierung und Wissenschaftlicher Akzeptanz eine wichtige Rolle.

Seit 2000 stellt die Zentralstelle zur Erfassung und Bewertung von Ersatz- und Ergänzungsmethoden zum Tierversuch (ZEBET) eine umfangreiche Online-Datenbank zur Verfügung, die bewertete Alternativmethoden zu Tierversuchen enthält (2). Diese Alternativmethoden berücksichtigen mindestens eines der drei international anerkannten, von Russel und Burch (1959) als „3R“ definierten Kriterien – Replacement (Ersatz), Reduction (Reduzierung der Zahl) und Refinement (Reduzierung von Schmerzen und Leid von Versuchstieren) von Tierversuchen.

Alternativmethoden für Tierversuche in der Prüfung von Arzneimitteln

Damit der Wirkstoff eines Arzneimittels für den Patienten biologisch verfügbar wird, muss er nach Freigabe aus der Formulierung Biomembranen passieren. Die Art der Applikation – beispielsweise einer Lösung als Injektion direkt ins Blut oder nach Schlucken über den Gastrointestinaltrakt zeitlich verzögert ins

* Kurzfassung des am 08.03.2013 in der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags als einer von drei Beiträgen zum Thema „Modelle in verschiedenen Disziplinen“.

Blut – beinhaltet die Überwindung unterschiedlicher Barrieren. Das Gleiche gilt außerdem für das finale Erreichen des Wirkortes. So sind die Blutgefäße im Gehirn derartig dicht mit Endothelzellen ausgekleidet, dass die sogenannte Blut-Hirn-Schranke nur bestimmte Moleküle passieren lässt. In Leber, Milz und rotem Knochenmark sind hingegen sowohl die Endothelschicht als auch die Basallamina der Blutgefäße lückenhaft, damit ein schneller Stoffaustausch für alle Arten von Stoffen möglich ist. Zwischen diesen Extremen sind die Blutgefäße aller anderen Organbereiche einzuordnen. Es liegt daher nahe, den Transport über Epithelien bzw. Endothelien hinweg nachstellen zu wollen. Die prinzipielle Nachbildung einer biologischen Membran aus Phospholipiden mit ihrem Doppelschichtcharakter gelingt zwar auch in einfachen physikalischen Membranmodellen, doch können diese der unter In-vivo-Bedingungen vorliegenden Komplexität und Variabilität nicht gerecht werden.

Unter Verzicht auf isolierte Gewebestücke von Tieren oder Menschen gelingt die Nachstellung von Transportprozessen mit Epithelmodellen aus der Zellkultur. Zweidimensionale Modelle, d.h. die flächenhafte Ausprägung einer einzelnen zusammenhängenden Schicht aus zahlreichen gleichartigen Zellen, erlauben die Untersuchung des Wirkstofftransports gelöster Moleküle aus einer einfachen Lösung oder gegebenenfalls im Einzelfall aus einem flüssigen Arzneimittel (z.B. Emulsion, Nanosuspension). Die Untersuchung des Wirkstofftransports aus dem applizierten Arzneimittel mit nicht flüssigem sondern halbfestem oder festem Charakter (Creme,Tablette) in ein physiologisches Akzeptorkompartiment verlangt dreidimensionale Gewebemodelle. Für nahezu alle Gewebe mit Absorptionsfunktion ist es inzwischen gelungen, solche 3D-Modelle in der Zellkultur zu züchten.

Am Beispiel von Modellen der Augencornea für die Untersuchung von Augenarzneimitteln und von Hautmodellen für die Arzneistoffaufnahme über die Haut sollen im Folgenden die Entwicklung solcher Modelle sowie deren Möglichkeiten und Grenzen bei ihrem Einsatz für Absorptionsuntersuchungen aus Arzneimitteln aufgezeigt werden.

Modell der humanen Cornea des Auges

Der transparente vordere Teil des menschlichen Auges ist die Cornea (Augenhornhaut). Sie erlaubt den für den Sehprozess essentiellen Lichtdurchtritt und grenzt das Augeninnere von der Umwelt ab. Die Cornea ist mehrschichtig aufgebaut: eine mehrreihige Epithelschicht sitzt einer kollagenreichen Hydrogelmatrix mit inkorporierten Keratozyten auf. An dieses kollagenreiche Stroma schließt sich eine einlagige Endothelschicht an, die in direktem Kontakt mit dem „Kammerwasser“ der vorderen Augenkammer im Innern des Auges steht. Damit der Wirkstoff eines in die Tränenflüssigkeit eingebrachten Augenarzneimittels in das Augeninnere gelangt, müssen alle Schichten der Cornea überwunden werden.

Humane Corneaspenden stehen für Arzneistoffabsorptionsuntersuchungen de facto nicht zur Verfügung, weil die Zahl an verfügbaren Hornhautspenden nicht einmal den Bedarf nach Corneae für die Transplantation deckt. Bei der Präparation von Spenderhornhäuten für die Transplantation bleiben jedoch ringförmige Gewebereste der an die Cornea angrenzenden Lederhaut (Sklera) übrig. Aus diesen skleralen Ringen ist es mit Hilfe von Zellkulturtechniken gelungen, die Stammzellen zur Vermehrung (Proliferation) und Differenzierung zu den die Cornea aufbauenden Zelltypen anzuregen und in ausreichend hoher Zahl anzuzüchten. Durch schrittweise Kultivierung der verschiedenen Schichten aus den jeweiligen Zelltypen wird dann innerhalb von ca. 4 Wochen ein Konstrukt aufgebaut, das in Morphologie und Transportverhalten für Wirkstoffmoleküle eine große Ähnlichkeit mit der humanen Cornea aufweist (3–5).

Da Species-spezifische Besonderheiten bezüglich der Funktionalität der Organe bekannt sind, ist es nicht überraschend, dass der Wirkstofftransport durch die Cornea des Schweins und des Kaninchens – beide Versuchstiere wurden bislang am häufigsten für derartige Tierversuche verwendet – deutlich voneinander verschieden ist. Die Kaninchencornea ist ca. 2- bis 4-mal permeabler als die Schweinecornea. Ein von Reichl durch Reduktion auf die beiden äußeren Schichten weiterentwickeltes „Hemicornea-Konstrukt“ liegt zwischen den Permeabilitätsergebnissen der tierischen Gewebe (6). Das Hemicorneakonstrukt beinhaltet als weitere Modifizierung immortalisierte (= unsterblich gemachte) Zelllinien. Dies hat den Vorteil einer unbegrenzten Verfügbarkeit dieser Zellen und einer reproduzierbaren Kultivierung der Konstrukte in gleichbleibender Qualität.

Für eine behördliche Akzeptanz und einen verbreiteten Einsatz des Modells ist eine Validierungsstudie nötig. Vor der Validierung wird in der Regel eine Prävalidierung durchgeführt. In einer solchen Prävalidierung wird in der Regel die Methodik verfeinert und danach die Kultivierungsvorschrift (standard operation procedure SOP) in wenigstens zwei weitere Labore übertragen und anhand einiger weniger ausgesuchter Substanzen überprüft (7). Diese Prävalidierungsstudie konnte die reproduzierbare Kultivierung des humanen Corneamodells mit gleichbleibender hoher Qualität in Bezug auf seine Barriereigenschaften für den transcornealen Substanztransport bestätigen. Solche organotypischen Corneamodelle können daher helfen Tierversuche zu reduzieren und zum Teil sogar zu ersetzen. Gleichzeitig werden die mit Züchtung und Haltung verbundenen hohen Kosten von Tierversuchen reduziert.

Aufbau und Funktion der menschlichen Haut

Die Haut als größtes Organ des Menschen hat vielfältige Funktionen zu erfüllen. Sie schützt vor dem Austrocknen und reguliert gleichzeitig die Körpertemperatur, sie schützt vor mechanischer Verletzung sowie dem Eintritt toxischer Substanzen

und Mikroorganismen aus der Umgebung in das Körperinnere. Der Schutz vor einer Vergiftung durch Schadstoffe aus der Umwelt ist durch die äußere Gewebeschicht der Haut, die aus abgestorbenen Zellen bestehende Hornhaut (Stratum corneum), gegeben. Das Stratum corneum stellt eine exzellente Barriere gegen einerseits das Verdunsten von Wasser und andererseits gegen den Transport von in Wasser löslichen Molekülen dar.

Das Stratum corneum nimmt seinen Ursprung in teilungsfähigen Zellen (Keratinocyten) der untersten Ebene der nicht durchbluteten Epidermis (Oberhaut). Mit der ersten Teilung verlieren diese Keratinocyten die Proliferationsfähigkeit und reifen auf ihrem ca. 30 Tage in Anspruch nehmenden Weg an die Hautoberfläche (Differenzierung). Sie verändern dabei ihre Morphologie und Funktion und sterben schließlich ab. Die toten Korneozyten bilden das Stratum corneum und werden schließlich als submikroskopisch kleine Einzelzellen oder Zellverbände abgeschilfert.

Unter der Epidermis befindet sich die von Blutgefäßen und Nerven durchzogene Lederhaut (Dermis oder Corium genannt). In ihr sind weitere Hautanhangsorgane wie Haare, Nägel, Schweiß- und Talgdrüsen verankert und ragen bis an die Hautoberfläche. Die Dermis ist eine hoch elastische, kollagen- und elastinreiche Schicht, in die die Zellen der Dermis (Fibroblasten) eingebettet sind.

Nach innen schließt sich das subkutane Fettgewebe (Subkutis) mit Schutzfunktion gegen Stoß und mechanische Verletzungen an. Es dient außerdem der Speicherung von Energiereserven.

Humane Hautmodelle für die Prüfung von Arzneimitteln

Organotypische 3D Humanhautmodelle beinhalten die lebende Epidermis und die Dermis. Sie werden in ähnlicher Weise wie die Corneamodelle über ca. 4 Wochen kultiviert. Die Ausbildung einer voll entwickelten Barrierefunktion fehlt dabei allerdings, da in dieser relativ kurzen Zeit kein vielschichtiges zusammenhängendes Stratum corneum entsteht. Bezüglich ihrer Barriereigenschaften für einen Substanztransport ähneln die 3D Hautmodelle der Säuglingshaut und nicht der Haut eines Erwachsenen, da es ca. 1 Jahr dauert, bis sich beim Neugeborenen die bis zum Lebensende unverändert funktionierende Schutzbarriere der Hornhaut aufgebaut hat.

Auf der Haut anzuwendende Arzneimittel können vielfältige Ziele verfolgen:

1. Es kann ausschließlich das Stratum corneum adressiert werden – beispielsweise mit einem Desinfektionsmittel die Hautoberfläche bei intakter Haut oder mit einem „Hühneraugenpflaster“ die Hornhaut selbst. Mit Hilfe des Pflasters soll übermäßige Hornhaut erweicht und abtragbar werden.

2. Es kann eine Erkrankung in den lebenden Bereichen der Haut (Epidermis, Dermis, Subkutis) behandlungsbedürftig sein oder es sollen Schmerzen im direkt unter der Haut liegenden Muskelgewebe bzw. im Gelenk therapiert werden.

3. Wird ein opiooidhaltiges Schmerzpfaster auf der Haut appliziert, muss der Arzneistoff nach Freigabe aus dem Pflaster und der Permeation durch Hornhaut und Epidermis bis in die Dermis gelangen, dort in die Gefäße aufgenommen werden, um mit dem Blutstrom schließlich seinen Zielbereich, das Schmerzzentrum im Gehirn, zu erreichen. Bei solchen auf der Haut applizierten Transdermalpflastern sind Applikations- und Wirkort nicht in unmittelbarer Nähe.

Je nach Fragestellung werden unterschiedliche Modelle einzusetzen sein. Ist die Überwindung der Hornhautbarriere der entscheidende Schritt für den Stofftransport aus einem Arzneimittel, ist isoliertes Stratum corneum aus Humanhautspenden aus der plastischen Chirurgie das geeignete Modell. Für die Untersuchung der Permeation in tiefer gelegene Gewebe der Haut sind die lebenden Schichten unverzichtbar und das 3D Humanhautmodell kommt zum Einsatz. Es ist nicht nur für Arzneistoffabsorptionsuntersuchungen geeignet sondern liefert auch wertvolle Ergebnisse zu Fragen des Schädigungspotentials von Arzneimitteln. In diesen Untersuchungen wird die Toxizität indirekt über die Erfassung der Viabilität (Lebensfähigkeit) der Modelle im Anschluss an eine Behandlung quantifiziert. Nach dem gleichen Prinzip sind die Effekte von Formulierungen auf die Wundheilung in einem Wundheilungsmodell zu ermitteln (8).

Sind Arzneimittel zur Behandlung von Erkrankungen der Hautanhangsorgane (z.B. Nagelpilz oder Entzündung der Talgdrüsen bei Akne) zu prüfen, werden weitere geeignete Modelle benötigt. Therapeutika gegen Nagelpilzerkrankungen lassen sich mit einem vollständig zellfreien Modell testen. Dazu können Keratinplättchen, die in einem mehrstufigen Verfahren aus naturblondem oder grauem Menschenhaar hergestellt werden (9), mit typischen, beim Menschen Nagelpilz verursachenden Mikroorganismen infiziert werden. Deren Abtötung durch die zu prüfenden Arzneimittel wird anschließend untersucht (10). Anstelle solcher Keratinplättchen werden alternativ präparierte Scheiben aus Rinderhufen verwendet, die allerdings abweichende Eigenschaften im Vergleich mit humanem Nagelmaterial aufweisen. Zur Untersuchung der Erreichbarkeit der Talgdrüse durch auf der Haut applizierte Arzneimittel bietet sich das sogenannte Schweineohrmodell an. Schweineohren von Schlachttieren für die Lebensmittelerzeugung werden in In-vitro-Untersuchungen verwendet, bei denen nach definierter Einwirkung des Arzneimittels eine Biopsie des Haarschaftes mit anhängender Talgdrüse durchgeführt wird. In dieser Biopsie lässt sich der Gehalt an Arzneistoff analytisch mit für den jeweiligen Arzneistoff spezifischen Nachweistechiken bestimmen (11).

Zusammenfassung und Ausblick

Gewebemodelle aus der Zellkultivierung humaner Epithelien und Endothelien bieten die Möglichkeit einer Reduzierung von Tierversuchen. Nahezu alle Organbereiche lassen sich bereits für die Prüfung des transepithelialen Transports von Arzneistoffen aus Arzneimitteln nachstellen. Die Bandbreite reicht von den im Vortrag vorgestellten Haut- und Augencorneamodellen über die Schleimhaut von Nase, Lunge oder des Magen-Darm-Trakts bis hin zur Nachbildung der Blut-Hirn-Schranke. Die kontinuierliche Weiterentwicklung bestehender Modelle wird zukünftig eine den physiologischen Gegebenheiten immer besser angepasste Qualität ergeben, so dass Reduzierung und weitest gehender Ersatz von Tierversuchen fortschreiten werden.

Literatur

- (1) http://www.bmelv.de/DE/Landwirtschaft/Tier/Tierschutz/_texte/Versuchstierzahlen2012.html
- (2) http://www.bfr.bund.de/de/animalt_zebet_datenbank_fuer_alternativmethoden_zu_tierversuchen-59741.html
- (3) REICHL, MÜLLER-GOYMANN (2004) Pharm Ztg **149**: 38–44
- (4) REICHL, BEDNARZ, MÜLLER-GOYMANN (2004) Br J Ophthalmol **88**: 560–565
- (5) REICHL, DÖHRING, BEDNARZ, MÜLLER-GOYMANN (2005) Eur J Pharm Biopharm **60**: 305–308
- (6) REICHL, (2008) J Pharm Pharmacol **60**: 299–307
- (7) HAHNE et al. (2012) J Pharm Sci **101**: 2976–2988
- (8) KOLDITZ, KRAUSZE, HEINZ, NIEMANN, MÜLLER-GOYMANN (2013) Eur J Pharm Biopharm doi: 10.1016/j.ejpb.2013.10.003.
- (9) LUSIANA, REICHL, MÜLLER-GOYMANN (2011) Eur J Pharm Biopharm **78**: 432–440
- (10) LUSIANA, REICHL, MÜLLER-GOYMANN (2013) Eur J Pharm Biopharm **84**: 599–605
- (11) LAUTERBACH, MÜLLER-GOYMANN (2014) Int J Pharm submitted

Higgs-Teilchen und vieles mehr – wozu dient der LHC?*

F. JOCHEN LITTERST

Institut für Physik der Kondensierten Materie, TU-Braunschweig
Mendelssohnstraße 3, D-38106 Braunschweig

Experimente am Large Hadron Collider LHC des Europäischen Kernforschungszentrums CERN in Genf haben 2012 Evidenz für die Existenz eines neuen Elementarteilchens geliefert. Seine Eigenschaften sprechen dafür, dass es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um das Higgs-Teilchen handelt. Dieses fundamentale Teilchen wurde vor fast fünfzig Jahren theoretisch im Rahmen des so genannten Brout-Englert-Higgs Mechanismus vorhergesagt, der zum Verständnis des Ursprungs der Massen subatomarer Teilchen beiträgt.¹

Neben der Suche nach dem Higgs-Teilchen stehen jedoch vielfältige Forschungsprojekte auf dem weiteren Programm für den LHC, die die Grenzen unseres Wissens von der Natur in subatomaren wie auch in kosmischen Dimensionen erweitern werden.

Der LHC sprengt Grenzen in vielfältiger Hinsicht. Die erzielten Teilchenenergien werden für viele Jahre die Obergrenze des Erreichbaren bleiben. Die Experimentiereinrichtungen sind sowohl in ihren räumlichen Dimensionen als auch bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit und Präzision bahnbrechend. Was neben den herausragenden wissenschaftlichen Leistungen oft weniger beachtet wird, sind die für Konzeption, Aufbau und Betrieb wesentlichen außergewöhnlichen Ingenieursleistungen und der technisch organisatorische Apparat einer Großforschungseinrichtung mit ca. 3000 Mitarbeitern und Tausenden Gastwissenschaftlerinnen und Gastwissenschaftlern aus mehr als 30 Ländern.

* Kurzfassung des Vortrags, der am 12. April 2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten wurde.

¹ Im Dezember 2013 wurde dafür der Nobelpreis Physik an François Englert und Peter W. Higgs verliehen.

Transdisziplinäre Energieforschung und Energiewende – Der Beitrag des EFZN*

H.-P. BECK, A. BECKER, M. JUHRS UND S. NAKHAIE

Energieforschungszentrum Niedersachsen
Am Stollen 19A, D-38640 Goslar

1. Herausforderungen der modernen Energielandschaft

Die Bereitstellung und Nutzung von Energie ist seit jeher ein zentraler Bestandteil der menschlichen Zivilisation. Besonders die heutige Gesellschaft ist auf eine sichere und nachhaltige Versorgung angewiesen, um den in den letzten Jahrhunderten gewonnenen Lebensstandard zu halten und weiter auszubauen. Dennoch wirft dieses Grundbedürfnis in unserer Zeit verschiedene, bisher nicht gekannte Probleme auf.

Zunächst ist dabei die zunehmende Knappheit der Energieressourcen zu nennen, die einem steigenden Bedarf durch die wachsende Weltbevölkerung und fortschreitende technologische Entwicklung gegenüber steht. Um diese Rohstoffe zu gewinnen, müssen immer anspruchsvollere und schwer zu erschließende Quellen erschlossen werden. Die Mehrheit des heutigen Energieversorgungssektors ist auf die Nutzung endlicher fossiler Rohstoffe ausgelegt. Im Jahr 2011 wurden über 80% des bereits enormen weltweiten Energiebedarfs damit gedeckt¹. In Deutschland wird diese drohende Versorgungsknappheit durch den Atomausstieg zusätzlich beschleunigt.

Dieses Ressourcenproblem wird verschärft durch ein Effizienzproblem. Angefangen bei geringen Wirkungsgraden von Kraftwerken über Transportverluste bis hin zu nicht notwendiger Verwendung geht Energie an vielen Stellen ungenutzt verloren. Beispielsweise betrug der durchschnittliche Wirkungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken in Deutschland im Jahr 2011 gerade einmal 40%². Ein Großteil der eingesetzten Primärenergie geht in Form von Abwärme für die Nutzung verloren.

* Der Vortrag wurde am 11.07.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

¹ International Energy Agency: Key World Energy Statistics. Paris 2013.

² Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. Berlin 2013.

Eine weitere Herausforderung ist die Senkenproblematik. Bei der Nutzung fossiler Energieträger wird das darin gespeicherte CO_2 in die Atmosphäre frei gesetzt. Durch diese Anreicherung befürchten Klimatologen dramatische Veränderungen. Eine nachhaltige Nutzung dieser Rohstoffe kann also nur erfolgen, wenn gleichzeitig ausreichend Kohlenstoffsinken, beispielsweise durch Aufforstung geschaffen werden. Aber auch eine Weiterverwendung oder Lagerung von Reststoffen kann Nachhaltigkeit gewährleisten. Ähnlich verhält es sich mit sonstigen Abfallstoffen der Energiegewinnung. Gerade in Deutschland ist der umstrittene Umgang mit radioaktiven Abfällen zu nennen. Auch hier scheint es bisher kein nachhaltiges Konzept zu geben.

Das größte Problem bei der Versorgung der Gesellschaft mit Energie ist aber das Bewusstseinsproblem. Ein Großteil der Menschen kennt weder die komplexen Schritte und den damit verbundenen Aufwand, um ihren täglichen Bedarf mit Energie zu decken, noch sind sie sich bewusst, dass die Versorgung mit Energie immer aufwendiger und arbeitsintensiver wird. Dabei könnten geringe Anpassungen im persönlichen Lebensumfeld insgesamt zu einer deutlichen Entlastung der Energielandschaft führen. Die hohe Netzsicherheit in Deutschland und die bisher gute Versorgungslage scheinen jedoch diese Probleme aus dem Leben der Menschen fern zu halten.

Es zeigt sich, dass die Versorgung mit Energie heute vor verschiedenen Herausforderungen steht, denen es zu begegnen gilt. Durch die von der Bundesregierung beschlossene Energiewende ist ein Weg zur Begegnung dieser Probleme politisch vorgezeichnet. Bis 2050 sollen dazu 80% des Bruttostromverbrauchs durch regenerativen Energieträger gedeckt² und gleichzeitig die Versorgungssicherheit und Qualität nicht gefährdet werden. Dadurch wird eine hohe Erwartungshaltung an die Wissenschaft generiert, da sie Antworten aufzeigen muss, um diesen Weg erschließen zu können. Wie können mehr regenerative Energieressourcen erschlossen werden? Wie können diese effizienter genutzt werden? Wie soll mit Rest- und Abfallstoffen aus der Energiegewinnung umgegangen werden? Und wie muss eine nachhaltige Energielandschaft gestaltet sein?

Um diese Fragen zu beantworten ist es notwendig, die komplexen Verknüpfungen in der Energielandschaft zu ergründen. Jedoch beschäftigen sich die klassischen wissenschaftlichen Disziplinen nur jeweils mit einzelnen Ausschnitten des Gesamtkomplexes. Es fehlt ein übergreifendes Fach der Energiewissenschaft, das diese Forschungen bündelt, koordiniert und somit ganzheitliche Antworten gibt.

Genau an diesem Punkt greift der neuartige Forschungsansatz des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) an. Grundlegender Gedanke ist, dass die Grenzen zwischen wissenschaftlichen Fächern aufgelöst, um zu verhindern, dass diese zu Erkenntnisgrenzen werden. Bereits erprobt und gängige Praxis ist dies bei Forschungsverbünden, die jedoch meist nur lose organisiert und auf Dauer einzelner Projekte gebildet werden. Die Langfristigkeit der Aufgabe er-

fordert jedoch eine dauerhafte Struktur. Zu diesem Zweck wurde das EFZN als ein Zentrum der Energieforschung gegründet.

2. Vorstellung der Struktur

Auf Initiative der TU Clausthal wurde das EFZN 2008 als gemeinsame Forschungseinrichtung mit den Universitäten Braunschweig, Göttingen, Hannover und Oldenburg gegründet³. Es steht für die dauerhafte Zusammenführung lösungsrelevanter Fächerkompetenzen, um offenen Fragen zur Gestaltung der Energielandschaft zu begegnen. Zentraler Bestandteil ist dabei die starke disziplinäre Forschung an den Instituten der Mitgliedsuniversitäten. Sie sind als Pfeiler zu sehen, die das EFZN durch seine Transdisziplinarität als Brücke überspannt. Dies könnte die Grundlage sein, um aus den einzelnen energiebefassten Wissenschaften künftig eine eigene Disziplin „Energiewissenschaft“ zu schaffen, deren Wissensspektrum und Lösungskompetenz der heutigen Problemlage mehr entsprechen würde.

2.1. Der transdisziplinäre Forschungsansatz

Der Ansatz der transdisziplinären Forschung des EFZN bedeutet den Brückenschlag zwischen den tradierten, mit der Energieforschung beschäftigten Wissenschaftsdisziplinen. Ingenieurs-, Wirtschafts-, Rechts-, Sozial- und Naturwissenschaften werden davon eingeschlossen. Sie bedeutet darüber hinaus die Auflösung der Grenzen zwischen theoretischer Forschung und praktischer Anwendung. Dazu kooperiert das EFZN immer wieder mit Partnern aus der Wirtschaft, um wissenschaftliche Erkenntnisse direkt umsetzen zu können. Transdisziplinarität ist nicht zuletzt die Schnittstelle zwischen wissenschaftlichen und gesellschaftspolitischen Fragestellungen, was beispielsweise bei den engen Verknüpfungen zwischen Energieversorgung und Umweltschutz deutlich wird.

Die Transdisziplinarität hebt die fachliche Begrenzung der Disziplinen an den Stellen dauerhaft auf, an denen auf Grund hoher Spezialisierung die problemlösende Kraft eingebüßt wurde. Der offene Dialog zwischen Vertretern verschiedener Fachdisziplinen auf Augenhöhe ist dabei eine grundlegende Voraussetzung. Ebenso ist es notwendig, dass Personen einbezogen werden, die einen kritischen Dialog führen können und über fundierte Kenntnisse in den beteiligten Disziplinen verfügen. Unter diesen Voraussetzungen geben, so ist dieser Forschungsansatz im Stande, gesellschaftliche Fragestellungen aufzugreifen und zu lösen, die von Einzeldisziplinen nicht erschließbar sind.

³ Energie-Forschungszentrum Niedersachsen: Jahresbericht 2012/2013. Goslar 2013.

Transdisziplinarität unterscheidet sich von der Inter- und Multidisziplinarität durch den Grad der Integration verschiedener Disziplinen. Multidisziplinarität stellt dabei die geringsten Integrationsgrad dar. Hierbei werden Forschungsgegenstände zwar parallel in verschiedenen Disziplinen untersucht, es fehlt jedoch an einer fachübergreifenden Abstimmung einer Strategie und einer Methode. Bei der Interdisziplinarität dagegen, findet genau dieses statt. Trotz dieser Abstimmung bleiben aber die Einzeldisziplinen voneinander unabhängig. Erst die Transdisziplinarität überspannt die Fachgrenzen und lässt somit die gemeinsame fachunabhängige Bearbeitung des Forschungsgegenstandes zu.

Die größte Hürde transdisziplinärer Forschung sind die teilweise stark differenzierten Begriffswelten in den einzelnen Disziplinen, die den Dialog behindern. Fest geprägte Fachbegriffe können in einer anderen Disziplin stark unterschiedliche Assoziationen hervorrufen. Eines von vielen Beispielen ist das Wort Integration, welches in der Mathematik einen anderen Hintergrund hat als in den Sozialwissenschaften. Genau deshalb ist es notwendig aktiv am vielversprechenden Ansatz der Transdisziplinarität zu arbeiten. Das EFZN möchte die noch junge Forschung üben, pflegen und mithelfen, diese im Energiebereich zu etablieren. Ziel kann dabei die Schaffung neuer (Aus-)Bildungsgänge sein. Beispielsweise mit einem Abschluss Energiewissenschaft.

2.2. Aufbau

Unter dem Dach des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen kooperieren 80 Wissenschaftler aus den fünf beteiligten Niedersächsischen Universitäten. Die wissenschaftliche Aufgabe des EFZN ist es, die zunehmend komplexer werden den Fragen zur Energiegewinnung und -veredelung oder auch zur Entsorgung von Abfallprodukten der Energieerzeugung durch eine verstärkte und dauerhafte Zusammenarbeit verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen zu beantworten. Somit wird eine Fokussierung erforderlich, welche die gesamte Energiekette in den Blick nimmt und die gegenseitigen Abhängigkeiten disziplinübergreifend bei der Problemanalyse und -lösung einbezieht.

Um den transdisziplinären Forschungsansatz entlang der gesamten Energiekette erfolgreich in die Praxis umsetzen zu können, ist das EFZN aufbauorganisatorisch in insgesamt neun Forschungsbereiche gegliedert (siehe Abbildung 1). Aus diesen werden zur jeweiligen Fragestellung projektbezogene Arbeitsgruppen gebildet. Jeder Forschungsbereich wird fachlich von einer/einem ProfessorIn der EFZN-Universitäten geleitet. Die Arbeit in den Forschungsbereichen vor Ort in Goslar wird durch Projektentwickler organisiert und gestaltet. Bei diesen handelt es sich um Postdocs bzw. ausgewiesene Fachleute mit langjähriger Berufserfahrung aus den Bereichen der Ingenieur- und Naturwissenschaften, Informatik sowie der Gesellschafts- und Geisteswissenschaften. Die Verschränkung der beteiligten

Disziplinen und Wissenschaftler erfolgt unter anderem durch gemeinsame wöchentliche Arbeitssitzungen, in denen Forschungsvorhaben diskutiert, entwickelt und umgesetzt werden. Die Projektentwickler nehmen somit eine Schlüsselfunktion bei der täglichen wissenschaftlichen Arbeit des EFZN ein.

2.3. Forschungsbereiche

Der steigende Bedarf an Rohstoffen beeinflusst die zeitliche Reichweite der Nutzung natürlicher Ressourcen. Gleichzeitig besteht bei der Gewinnung dieser Rohstoffe die Notwendigkeit zu einer möglichst nachhaltigen Bewirtschaftung der natürlichen und endlichen Lagerstätten. Die Kosten für die Energiebereitstellung hängen in direkter Weise von technischen Innovationen zu weiteren Effizienzsteigerungen bei der Rohstoffgewinnung ab. Im Forschungsbereich *Energierohstoffe und -speicher* werden vor diesem Hintergrund folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Nachhaltige Energieversorgung: Um die negative ökologische Folgen und die Abhängigkeit von Importen mittel- bis langfristig reduzieren zu können, wird an einer grundlastfähigen und nachhaltigen Energieversorgung geforscht. Beispiel dafür ist die Tiefengeothermie.
- Optimierung bei der Rohstoffversorgung: Mittelfristig wird weltweit ein Großteil der Energie von verhältnismäßig großen zentralen Anlagen, auf Basis von fossilen Brennstoffen erbracht. Für diese Energierohstoffe bzw. für weitere mineralische Rohstoffe liegt der Schwerpunkt bei Effizienzsteigerungen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten für Erkundung, Gewinnung und Aufbereitung aus primären und sekundären Quellen.
- Energiespeicherung: Um die fluktuierende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Ressourcen zu verstetigen und einen zuverlässigen Netzbetrieb und die Systemsicherheit zu gewährleisten, besteht ein Bedarf an Energiespeichersystemen mit spezifischen Anforderungen an Leistung, Kapazität und Dynamik.

Der Forschungsbereich *Energiewandlung und Veredelung* umfasst die Prozesse der Energiewandlung bzw. der Bereitstellung von Endenergie. Die Veredelung der Energie ist geprägt von der Art der Bereitstellung, wie zum Beispiel der Direktvermarktung, Speicherung oder stofflichen Konversion. Bei den Forschungsarbeiten werden die elektrochemische, mechanische, thermische und stoffliche Wandlung und Speicherung, sowie die Kopplung von Prozessen und Komponenten betrachtet. Durch die Gesamtsystembetrachtung und die Integration neuer innovativer Prozesse in bestehende Systeme kann ein wesentlicher Beitrag zur Transformation des Energiesystems geliefert werden.

Zu den Themenfeldern, die den Schwerpunkt der Arbeiten im Forschungsbereich *Energiesysteme und Prozessenergie-technik* bilden, gehören zum einen Energiesysteme, darunter fallen Wandlung, Transport, Verteilung, Speicher, Nutzung

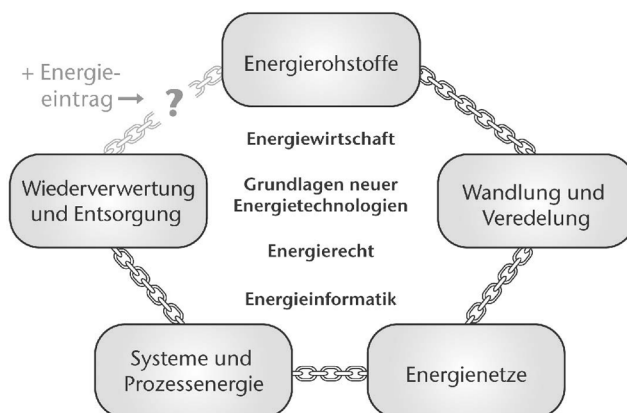


Abbildung 1.

und Management. Zum anderen beschäftigen sich die Wissenschaftler mit der Leistungsmechanik, einem interdisziplinären Gebiet der Ingenieurwissenschaften, sowie der Prozessenergie, deren Problematik im Bereich der Energieoptimierung und Energieeinsparung in der Industrie, in Kraftwerken sowie beim Endverbraucher liegt. Die industrielle Prozessenergie ist eine Querschnittstechnologie, die bei vielen Herstellungs- und Bearbeitungsprozessen aus technologischer und energetischer Sicht eine zentrale Bedeutung einnimmt.

Im Forschungsbereich *Energienetze* liegt der Fokus auf Systemen für den Energietransport und die Energieverteilung. Zu den Themenschwerpunkten gehören elektrische Übertragungs- und Verteilungsnetze, Gasnetze (einschließlich Druckluftnetze) sowie Wärme- und Kältenetze. Die Veränderung des Energie-Mixes bei der Stromerzeugung zugunsten der Erhöhung des regenerativen Anteils erfordert ebenso wie die dezentrale Nutzung der Abwärme von Kleinkraftwerken zur Verbesserung der CO₂-Bilanz einen Umbau des heutigen Transport- und Verteilungsnetzes für die elektrische Energie. Geothermie mit Wärmepumpen, Solarthermie mit Kollektoren in Verbindung mit thermischen Speichern werden künftig immer stärker in die Energiesystemtechnik einzubinden sein.

Eine effiziente Nutzbarmachung von Abfällen sowie die sichere und umweltverträgliche Entsorgung nicht wieder verwertbarer Abfälle gehören zu den Kernaufgaben der Rohstoffsicherung und des Umweltschutzes. Der Forschungsbereich „Wiederverwertung und Entsorgung“ stellt sich diesen Aufgaben und führt interdisziplinäre Forschungsarbeiten unter anderem zur Nutzbarmachung von Massenabfällen und zu Verwertungstechnologien für ausgediente Produkte und Einrichtungen (Recycling) und zur energetischen und thermischen Verwertung von Alternativbrennstoffen aus Abfällen durch.

Im Forschungsbereich *Energieinformatik* arbeiten die Wissenschaftler an geeigneten Ansätzen für die Gesamtsicht auf Erzeugung, Verbrauch und Speicherung in dynamischen und komplexen Wirkzusammenhängen. Sie befassen sich unter anderem mit Verbundbildungsmechanismen, Steuerungsalgorithmen und Automatisierungsstrategien. Für einen Wandel in der Energieversorgung müssen die konventionell zentral angelegten Kraftwerksleistungen durch ein Zusammenspiel regenerativer Energieanlagen in einem dezentralen Energiesystem substituiert werden. In intelligenten Energieversorgungsnetzen der Zukunft, den sogenannten „Smart Grids“, werden Versorgungsinfrastrukturen an dedizierten Stellen von Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen zu unterstützen sein, um eine rechtzeitige Organisation und Koordination sowie eine sofortige Interaktion aller Netznutzer zu ermöglichen.

Zur Bewertung und Ausgestaltung von energetischen Konzepten ist die Betrachtung von wirtschaftlichen Aspekten essentiell. Dies geschieht im Forschungsbereich *Energiewirtschaft*. Einerseits muss die Wirtschaftlichkeit von Produktionsverfahren, zum Beispiel zur Herstellung von Biokraftstoffen oder zur energetischen Nutzung von Biomasse, ermittelt werden. Andererseits stehen den wirtschaftlichen Kriterien wie Ertrag, Verkaufspreis oder Kosten des Anlagenbetriebs etliche ökologische und soziale Herausforderungen gegenüber, wie etwa CO₂-Bilanz und Akzeptanz vor Ort, die ebenfalls zu berücksichtigen sind. Dazu bietet das EFZN unter anderem auch über die beteiligten Mitglieder an den jeweiligen Universitäten wichtige Expertise.

Der Forschungsbereich *Energierrecht* strebt an, Kompetenzen in den wesentlichen Bereichen des Energierechts vorzuhalten. Berücksichtigt werden insbesondere das Regulierungsrecht, das Recht des Netzausbaus und Rechtsfragen der nachhaltigen Energieversorgung. Die Arbeit der Wissenschaftler des Forschungsbereichs richtet sich zum einen auf die energierechtlichen Aspekte übergreifender energiebezogener Aufgabenstellungen entlang der gesamten Energiekette. Zum anderen strebt der Forschungsbereich die breitere juristische Bearbeitung dreier Themenschwerpunkte an: „Regulierungstiefe“, „Nachhaltige Energieversorgung und Markt“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen neuer Energie- und Klimaschutztechnologien“.

Die Arbeiten im Forschungsbereich *Grundlagen neuer Energietechnologien* konzentrieren sich zunächst schwerpunktmäßig auf die beiden Themengebiete „Energiewandlung mit neuen Materialien“ und „Sensorik zur optimierten Energieeffizienz“. Bei der Materialentwicklung stehen für Sensor- und Aktuatorapplikationen insbesondere Hochtemperaturmaterialien und für die Energiewandlung nanoskalige Materialien im Vordergrund künftiger Entwicklungen. Auf der Basis verbesserter und neuer Materialien sollen neue Funktionsprinzipien zielorientiert geschaffen und erprobt werden. Daneben spielen die Entwicklung neuer Konzepte zur Miniaturisierung von Sensoren und Sensorsystemen eine wesentliche Rolle.

3. Projektbeispiele transdisziplinärer Forschung

Basierend auf den Empfehlungen zu Schwerpunkten der niedersächsischen Energieforschung⁴ haben EFZN-Vorstand und -Kuratorium insgesamt sieben Forschungsschwerpunkte beschlossen (siehe Abbildung 2). Es handelt sich dabei zunächst um die Themenfelder „Smart Grids“, „Bioenergie“, „Windenergie“ und „Gesellschaftswissenschaftliche Energieforschung“, welche vorrangig an den jeweiligen Standorten der EFZN-Mitgliedsuniversitäten weiterentwickelt werden. Die weiteren Schwerpunktthemen „Energiespeicher und -systeme“, „Tiefengeothermie“ und „Materialwissenschaftliche Energieforschung“ sind hingegen profilbildend für das EFZN am Standort Goslar.

Als Beispiele für die transdisziplinäre Forschung am EFZN sollen im Folgenden drei der 52 derzeit laufenden Vorhaben vorgestellt werden:

3.1. Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit

- Stromautobahnen im Verbundnetz
- e-home Energieprojekt 2020
- Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit

Die Stabilität und Zuverlässigkeit der Stromversorgung ist gegenwärtig von der Dominanz zentraler und leistungsstarker Kraftwerke, einer großen Reservekapazität von schnell aktivierbaren Spitzenlastkraftwerken, den Eigenschaften elektromechanischer Synchronmaschinen und leistungsfähigen Transport- und Verteilnetzen geprägt. Außer wenigen, großen Pumpspeicherkraftwerken kommen so gut wie keine Energiespeichereinheiten in der Stromwirtschaft zum Einsatz. Die Struktur der Stromversorgung wird sich langfristig deutlich verändern. Im Speziellen ist die zunehmende dezentrale, kleinteilige und umrichterdominierte Einspeisung aus erneuerbaren, meist fluktuierenden Energiequellen bei gleichzeitiger Verdrängung konventioneller Großkraftwerke zu nennen. Die Konsequenzen dieses langfristigen Veränderungsprozesses im Hinblick auf die Sicherheit und Stabilität der Versorgung sind bereits kurzfristig relevant.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im September 2012 das EFZN beauftragt, im Rahmen einer Kurzstudie aufzuzeigen, welche Speichertechnologien verfügbar und geeignet sind, einen

⁴ Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen: Energieforschung in Niedersachsen 3/2011. Hannover 2011.

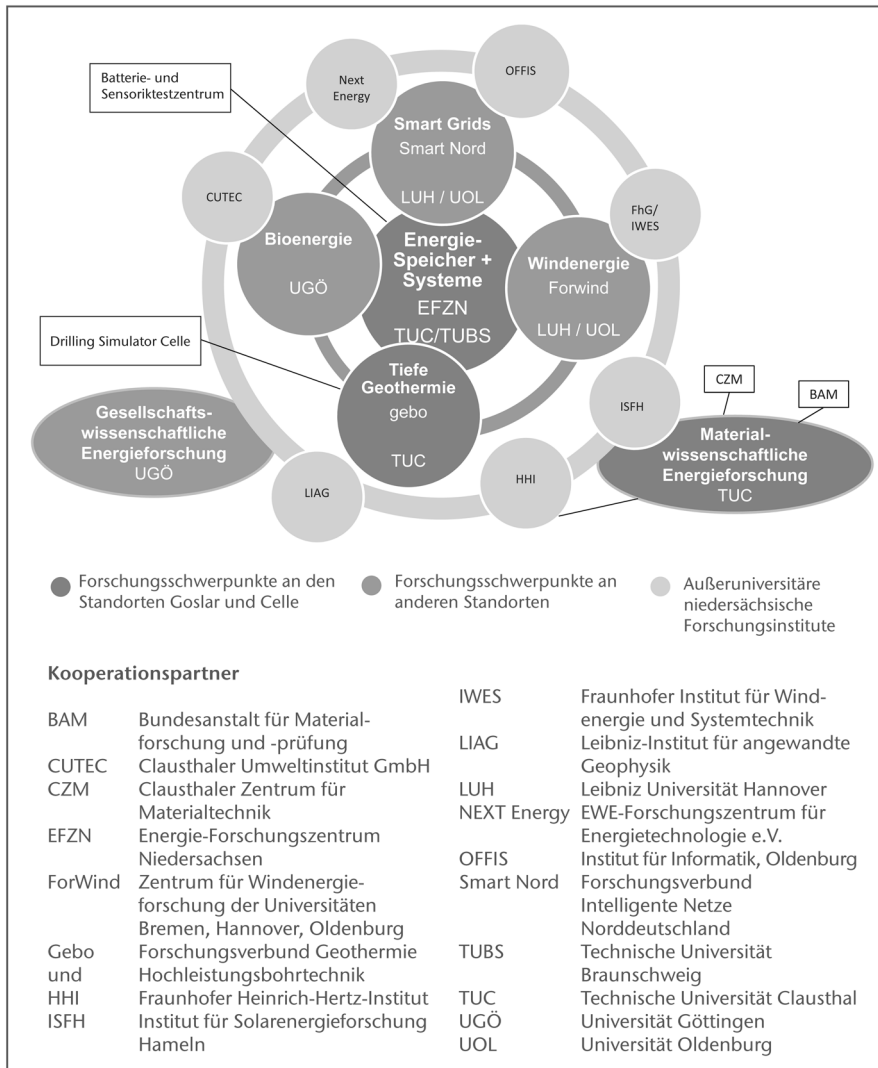


Abbildung 2.

Beitrag zur Stabilität und Sicherheit der zukünftigen Stromversorgung zu leisten. Zur Durchführung dieser Studie ist am EFZN ein disziplinübergreifendes Projektteam entsprechend Abbildung 3 gebildet worden.

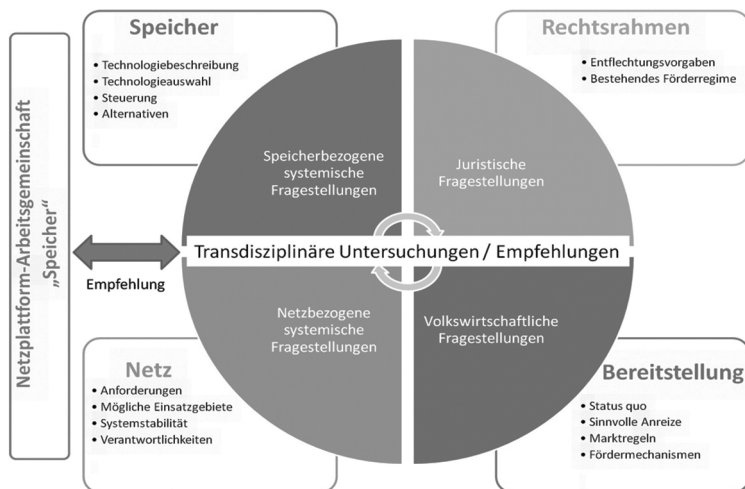


Abbildung 3.

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung wurde zunächst der Begriff der Systemsicherheit entsprechend Abbildung 4 in die Begriffswelt der Energiewirtschaft eingeordnet. Dabei wird die Systemsicherheit als Bewahrung eines stabilen und zulässigen Systemzustands definiert. Im Speziellen ist gemeint, dass Störeinflüsse auf das System sicher beherrscht werden können und ein sicheres Zusammenspiel der Systembereiche Erzeugung, Handel und Netzbetrieb gewährleistet wird. Bisher existiert keine Messgröße, die direkt den Grad der Systemsicherheit angibt. Hier könnte zum Beispiel die Schaffung eines allgemein anerkannten Index zukünftig sinnvoll sein.

3.1.1. Technischer Untersuchungen und ausgewählte Ergebnisse

Die Studie zeigt zum Einen mögliche, die Systemsicherheit beeinflussende Einsatzfelder für Speichertechnologien auf. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Präqualifikationsanforderungen für Speicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen gelegt und wichtige Eckdaten determiniert. Dies sind bspw. die Höhe der minimal einzuspeisenden Wirkleistung, die minimal zu realisierende Erbringungsdauer und der Leistungsgradient. Außerdem wurden mögliche Hemmnisse für einen Speichereinsatz zur Erbringung von Systemdienstleistungen aufgezeigt. Dabei sind vor allem bei der Primärregelleistung die Erbringungsdauer und bei der Sekundärregelleistung die Höhe der Einspeiseleistung möglicherweise kritisch zu bewerten. Diesen Hemmnissen kann bspw.

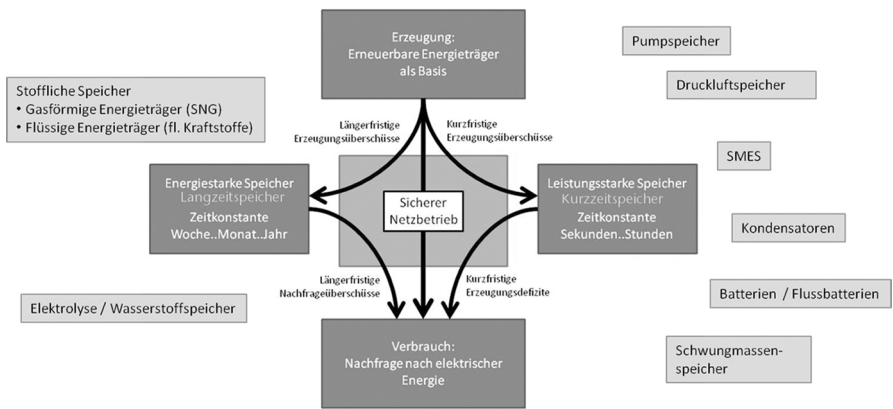


Abbildung 4.

durch das „Anlagenpooling“ von Speichern und der Möglichkeit zur Besicherung der ausgeschriebenen Regelleitungen durch Anlagen Dritter begegnet werden. Eine Kenngröße für den zukünftig ggf. notwendigen Speichereinsatz ist die zu erwartende Überschussenergiemenge, die sich aus der Einspeisung von erneuerbaren Energiequellen und sicherheitsrelevanten „Must-Run-Einheiten“ ergibt. Hinsichtlich des zukünftigen Regelenenergiebedarfs kann festgehalten werden, dass dieser bei einem weiteren Erneuerbare Energien-Ausbau voraussichtlich ansteigen wird, allerdings ist hier nicht mit einem proportionalen Wachstum zu rechnen. Welche Technologien/Optionen zu welchem Zeitpunkt welche Beiträge zur Lösung dieser Herausforderung erbringen können, ließ sich im Rahmen dieser Studie nicht ableiten und hängt auch von dem Einsatz alternativer Flexibilitätsoptionen wie dem Netzausbau ab.

Zum Anderen wurde parallel zur Untersuchung der Einsatzgebiete auf die derzeit bekannten Technologien zur Speicherung elektrischer Energie eingegangen. Hierbei wurden die charakteristischen Eigenschaften mechanischer, elektrischer, elektrochemischer und auch stofflicher Speicher hinsichtlich der möglichen Speicherkapazitäten, ihrer Leistungsbereiche und -gradienten aufgezeigt.

Elektrische (DSK, SMES) und elektrochemische Speicher besitzen bisher nicht das Potential für einen marktfähigen Betrieb. Weiterentwicklungen insbesondere der Lithium-Batterietechnik, der Redox-Flow-Batterien sowie der Metall-Luft-Batterien lassen auf große Speichersysteme (>1 GWh) bei Kosten bezogen auf den Energieinhalt vergleichbar zu Pumpspeicherwerken hoffen. Pumpspeicherwerke lassen sich unter gewissen Rahmenbedingungen wirtschaftlich betreiben, jedoch



Quelle: EFZN / M. Schmidt, S. Hißbach, Beyer

Abbildung 5.

ist nur noch geringes Ausbaupotential vorhanden. Die bisher einzigen großen industriell genutzten Druckluftspeicherkraftwerke werden in McIntosh sowie in Huntorf betrieben. Sie besitzen jedoch einen relativ schlechten Wirkungsgrad von etwa 50%. Adiabate Speicher oder Speicher mit zusätzlichem Wärmespeicher zur Erhöhung des Wirkungsgrades auf 70% befinden sich noch im Forschungsstadium. Die stoffliche Speicherung lässt die notwendigen Potentiale zur Speicherung großer Energiemengen erwarten, die in zukünftigen Energiesystemen für den saisonalen Ausgleich an Bedeutung gewinnen werden. Derzeit befinden sich aber sowohl die großtechnische Elektrolyse als auch die Wasserstoffspeicherung in Kavernen oder in Druckspeichern noch im Forschungsstadium. Die Speicherung im Erdgasnetz, welche ein großes Potential besitzt, ist technisch mit großen Herausforderungen verbunden.

Zur Einordnung der Speichertechnologien in das gesamte Energiesystem werden auch andere Flexibilisierungsoptionen wie die Steuerung der Nachfrage nach elektrischer Energie (Demand-Side-Management) zur Verringerung des Speicherbedarfs, das Erzeugungsmanagement oder der flexible Betrieb konventioneller Kraftwerke vorgestellt. Der Energieimport und -export bieten eine weitere Option zum Ausgleich fluktuierender Differenzen von Stromangebot und -nachfrage.

Die oben genannten Speichertechnologien befinden sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt teilweise noch im Entwicklungsstadium. Deren Einsatz im Elektroenergiesystem ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie z.B. der Geschwindigkeit des Netzausbaus oder des weiteren Zubaus der erneuerbaren Energien. Auf der Basis des derzeitigen Wissens können daher keine objektiven und belastbaren

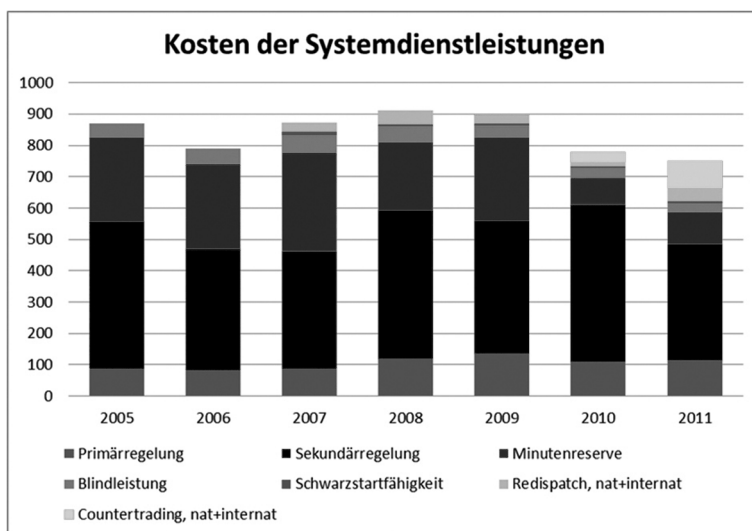


Abbildung 6.

Aussagen darüber getroffen werden, welche Speichertechnologien zu welchem Zeitpunkt erforderlich werden. Wird z.B. eine starke Flexibilisierung des konventionellen Kraftwerkspark als Übergangstechnologie vorgenommen, lässt sich die Notwendigkeit eines Speichereinsatzes zeitlich nach hinten verschieben. Einen ähnlichen Effekt würde ein verstärkter Einsatz des Demand-Side- und Erzeugungsmanagements bewirken.

Im weiteren Projektverlauf wurden die Ergebnisse beider Untersuchungen verschnitten und somit eine Zuordnung von Speichertechnologien und Einsatzgebieten vorgenommen und einer Bewertung unterzogen. Als wesentliche Aussagen der technischen Analysen lassen sich zusammenfassen, dass Batteriespeicher in naher Zukunft erfolgreich am Primärregelenergiemarkt tätig werden können. Ebenfalls können Batteriespeicher einen Beitrag zur Schwarzstartfähigkeit von Kraftwerken und zur Spannungshaltung in der Nieder- und Mittelspannungsebene leisten. Sehr schnelle Speicher, wie vor allem Schwungmassenspeicher können durch Erbringung der Momentanreserve die Netzsicherheit und Systemstabilität erhöhen. Alle diese Speicher müssen jedoch innerhalb eines Anlagenpools am Regelleistungsmarkt agieren. Weitere Flexibilisierungsmaßnahmen wie Demand-Side- und Erzeugungsmanagements erfüllen die vorgelegten Bewertungskriterien zur Erbringung von Systemdienstleistungen aus Sicht der Netz- und Systemsicherheit nicht hinreichend. Deren Einsatz zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt ist daher Speichertechnologien unter bestimmten Bedingungen unterzuordnen.

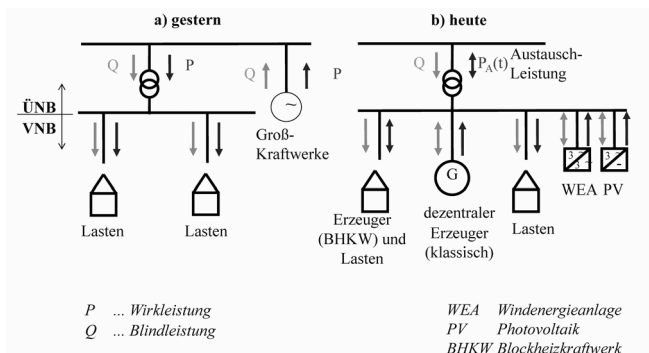


Abbildung 7.

Neben den Systemdienstleistungen stellt auch die Beseitigung von Netzengpässen eine sicherheitsrelevante Komponente dar.

Generell können zentrale und dezentrale Speicher durch ein intelligentes Verhalten einen positiven Beitrag für das Übertragungs- und das Verteilnetz leisten (netzdienlicher Speicherbetrieb). Hierunter fallen lokale Effekte wie die aktive Spannungsstützung durch lokale Blindleistungsbereitstellung, die Reduktion bzw. die Verzögerung von Netzausbaumaßnahmen sowie die Reduktion von Verlusten. Des Weiteren können Speicher im Anlagenverbund Regelleistung bereitstellen oder durch die Reduktion der lastseitigen Abendspitze die Notwendigkeit konventioneller Spitzenlastkraftwerke verringern und somit für das Energiesystem global systemstabilisierend wirken.

3.1.2. Rechtlicher Untersuchungsgegenstand und ausgewählte Ergebnisse

Hinsichtlich der Fragestellung nach einer sinnvollen und zulässigen Wahl eines Speicherbetreibers ist aus technischer Sicht kein Modell zu präferieren. Aus dem ebenfalls durchgeführten rechtlichen Untersuchungsgang ergibt sich, dass im Hinblick auf die Vorgaben zur Entflechtung von Stromspeicheranlagen verschiedene Konstellationen differenziert zu betrachten sind. Geboten ist eine Differenzierung

- nach dem Zweck der Speichernutzung (für Netzbetrieb, Erzeugung, Handel/Vertrieb oder eigenständig),
- nach dem Blickwinkel der Entflechtungsprüfung (Entflechtung des Netzes oder Entflechtung des Stromspeichers)

– sowie nach den unterschiedlichen Entflechtungsarten (informativ, buchhalterisch, rechtlich, operationell, eigentumsmäßig).

Zur Bestimmung der im konkreten Fall geltenden Entflechtungsvorgaben ist vor allem danach zu unterscheiden, welcher Zweck mit dem Betrieb des Stromspeichers verfolgt wird. Bislang noch offen sind die hierfür relevanten Fragen, ob die Stromspeicherung auch als Erzeugung eingeordnet werden kann und wie der Betrieb von sog. Power- to-Gas-to-Power-Anlagen zu behandeln ist.

3.1.3. Ökonomische Analysen und ausgewählte Ergebnisse

Die weiterhin durchgeführten ökonomischen Untersuchungen zeigen, dass die Investitionskosten von Speichern nur schwer abzuschätzen sind, da viele Technologien bislang nur im Labormaßstab existieren. Die Gesamtkosten variieren stark mit der technischen Auslegung und der Betriebsweise. Diese umfasst jedoch ein breites Spektrum unterschiedlicher Einsatzgebiete und wechselnder Strategien. So kann bspw. die Teilnahme an Regelenergiemärkten für einen alleinstehenden Speicher andere Fahrweisen erfordern als der Betrieb im Pool mit Kraftwerken. Ohne umfangreiche Marktsimulationen sind derzeit erste fundierte Angaben zu den Betriebskosten von Speichern nicht möglich. Die Bestimmung einer günstigsten Technologie wird zudem dadurch erschwert, dass es keine Technologie gibt, die alle abzudeckenden Einsatzbereiche erschließen kann. Eine ausführliche Beschreibung der derzeitigen Ausgaben für den Erhalt der Systemsicherheit ist vorgenommen worden.

Zum Abschluss wird die Bereitstellungslogik der Systemsicherheit untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die bestehenden Regelungen zum Erhalt der Systemsicherheit grundsätzlich funktionieren. Jedoch wurden zahlreiche Problemfelder identifiziert, welche die marktgeführte Bereitstellung von Systemdienstleistungen beeinträchtigen und den Bedarf an Sicherungsinstrumenten durch zusätzliche Netzbelastungen unnötig erhöhen. Ein schwerwiegendes Problem ist das Marktversagen im Bereich der europaweiten Bereitstellung von Systemdienstleistungen. Die fehlende Koordination der nationalen Versorgungsstrategien eröffnet Spielräume zur Externalisierung von Kosten. Allein aus diesem Motiv heraus lässt sich die ökonomische Notwendigkeit staatlichen Handelns zur Überarbeitung der geltenden Marktregeln rechtfertigen. In der bestehenden Marktstruktur ist ohne eine derartige Marktordnungspolitik kaum damit zu rechnen, dass Betreiber und Technologien, die durch eine hohe Kapitalintensität und hohe irreversible Kosten geprägt sind, am Markt eine Chance haben. Da die zukünftige technologische Entwicklung in allen für die Systemsicherheit relevanten Bereichen nur bedingt prognostizierbar ist, gleichzeitig aber die objektive Notwendigkeit von Maßnahmen zur Sicherung der Versorgungssicherheit auf Grund der Herausforderungen der Energiewende zunimmt, könnte hieraus eine Art Portfolioansatz konstruiert

werden. Hierdurch wird zumindest die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass in den verschiedenen Segmenten der Speichertechnologien eine Entwicklung in Richtung potenzieller Marktreife erfolgt.

Die im weiteren Verlauf durchgeführte Analyse zeigt einzelne Optionen für eine Förderung des Ausbaus von Energiespeichern und weiteren systemstabilisierenden Technologien auf und nimmt eine kurze ordnungspolitische Vergleichsanalyse vor. Gleichzeitig werden die bestehenden Förderinstrumente für Stromspeicher vorgestellt. Bei den wesentlichen Instrumenten, die der Förderung von Stromspeichern dienen, handelt es sich um:

- Netzentgeltbefreiungen,
- Befreiungen von der EEG-Umlage,
- Stromsteuerbefreiungen.

Ohne abschließende Empfehlungen für ein oder mehrere ordnungspolitisch optimale Förderinstrumente geben zu wollen, können dennoch folgende Kernaussagen zur möglichen Gestaltung des Förderrahmens zusammengefasst werden:

- Forschungsförderung bleibt langfristig notwendig.
- Ausnahmetatbestände (z. B. Befreiung von Netznutzungsgebühren) für einzelne Branchen oder konkurrierende Maßnahmen sollten vermieden werden.
- Leicht vermeidbare Investitionshemmnisse wie z.B. Entschädigungsregelungen nach § 12 EEG sind zu identifizieren und zu beseitigen.
- Der Zubau muss sich technologieoffen an der Fähigkeit der Technologien zur Erbringungen der benötigten systemstabilisierenden Leistungen orientieren, um technologische Fehlentwicklungen („lock-ins“) vermeiden zu können. Auf die Einführung neuer Umlagen auf Netz- bzw. Stromkunden sollte verzichtet werden.
- Zusätzliche Förderinstrumente sollten erst als letzte Option in Erwägung gezogen werden.

Weitergehende Informationen können auf den Seiten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologien abgerufen werden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse der Studie im Rahmen der EFZN-Schriftenreihe (Band 13) veröffentlicht worden⁵.

⁵ Arbeitsgruppe Energiespeicher des EFZN: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Bd. 13. Goslar 2013.

3.2. Stromautobahnen für das Verbundnetz

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung hat sich zwischen den Jahren 2000 bis 2011 von 6% auf 20,1% mehr als verdreifacht⁶. Das ehrgeizige Ziel der Bundesregierung, diesen Anteil bis zum Jahr 2050 auf 80% zu steigern², würde eine weitere starke Zunahme dieser Erzeugerleistungen bedeuten. Die sich dabei ergebenden Veränderungen des Energieversorgungssystems führen insgesamt zu einer Umstrukturierung der Versorgungsaufgabe: weg von den verbrauchsnahe zentralen Großkraftwerken (Bild 7a), die in Übertragungsnetze einspeisen, hin zu einem zunehmend dezentralisierten Versorgungssystem mit verbrauchsferneren Erzeugungsanlagen, die sowohl Wirkleistung P als auch Blindleistung Q bereitstellen werden (Bild 7b). Dies hat zur Folge, dass dezentrale Stromeinspeisungen der dargebotsabhängigen Anlagen vermehrt die regionale Nachfrage übersteigen und diese im günstigsten Fall mit den ausgebauten Übertragungsnetzen zu anderen Regionen mit ungedecktem Bedarf transportiert werden müssen. Dies hätte einen erheblichen Ausbau des heutigen Drehstromverbundnetzes zur Folge⁷.

Es stellt sich deshalb die Frage, inwieweit ein Ausbau des Drehstromverbundnetzes dem Neubau eines Gleichstromtransportnetzes vorzuziehen ist. In dieser Hinsicht bietet die vorliegende regionalisierte Untersuchung der künftigen Erzeugungssituation einen Ansatz, um einerseits notwendige Transportkapazitäten und andererseits regionale Lösungsansätze und Handlungsempfehlungen zur Reduzierung des Netzausbaus bzw. -neubaus zu identifizieren.

3.2.1. Methodik zur Untersuchung der Energieregionen

Für eine regionalisierte Untersuchung wird als Ausgangspunkt eine Charakterisierung der großflächigen Verteilnetze anhand netzrelevanter Daten, Strukturmerkmale und installierter erneuerbarer Energieanlagen durchgeführt⁸. Die jeweils installierten Erzeugungsleistungen werden ermittelt und anschließend gemäß Netzentwicklungsplan (Leitszenario B) der Bundesnetzagentur auf das Jahr 2032 hochskaliert. Auf Basis der erhobenen Daten ergeben sich dann anhand einer Verhältnisbildung zwischen den installierten Windenergie- und Photovoltaikleistungen zu Transformatorleistungen und Jahreshöchstlast die folgenden

⁶ Agentur für Erneuerbare Energien. www.unendlich-viel-energie.de (2011).

⁷ Deutsche Energieagentur GmbH: Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. Berlin 2010.

⁸ Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen. Stand: 2010.

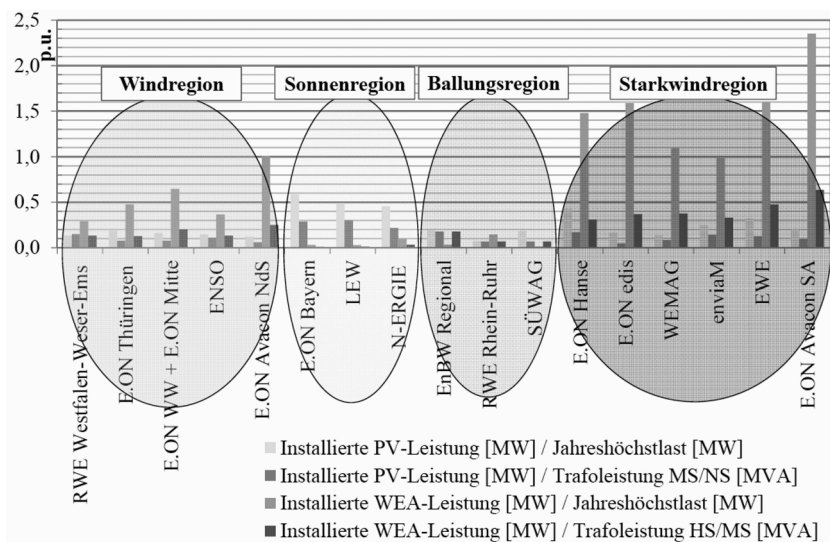


Abbildung 8.

kategorisierten Regionen: Starkwind, Wind, Sonne und Ballung (Bild 8). Diese Regionen werden der weiteren Untersuchung zugrunde gelegt.

Die Erzeugungslastgänge der Windenergie- und PV-Anlagen werden auf das Jahr 2011 normiert, dem jeweiligen Netzbetreiber zugeordnet und auf das Jahr 2032 hochskaliert. Die Energieerzeugung aus Biomasse, Biogas, Laufwasser und Geothermie wird konstant mit einer jährlichen Betriebsdauer von rd. 6000 h angenommen. Unter der weiteren Annahme einer bis 2032 gleichbleibenden Verbrauchslast werden die Austauschleistungen $P_A(t)$ zwischen Verteilungs- und Übertragungsnetz berechnet. Auf Basis dieser Ergebnisse ergeben sich die Zeitreihen und Dauerlinien der Austauschleistungen der Energieregionen, aus denen die Folgerungen für einen in jedem Fall notwendigen Übertragungsnetzausbau abgeleitet werden können (Bild 9).

3.2.2. Nutzbarmachung von Überschussstrom am Beispiel der Starkwindregion

Um die naturbedingt schwankende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in das Versorgungsnetz zu integrieren, stehen grundsätzlich folgende Maßnahmen zur Verfügung:

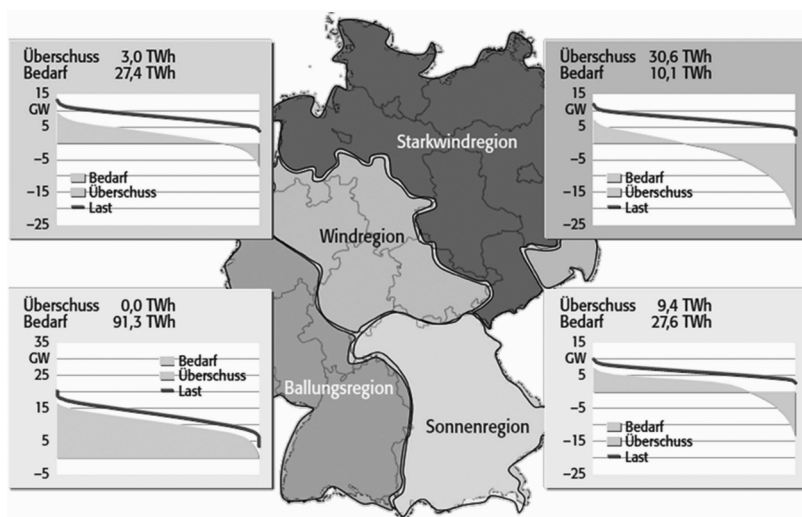


Abbildung 9.

Spitzenbeseitigung

- Energiemanagement/Demand- Side-Control
- Produktionsmanagement (z. B. Regelenergiebereitstellung aus Bioenergie)

Regionale Speicherung

- Leistungsspeicher (Kurzzeitspeicher, z. B. durch Pumpspeicherwerke (Über- oder Untertage⁹) zur Glättung von Last- und Erzeugerspitzen,
- Energiespeicher (z. B. Wasserstoffspeicher) für den saisonalen Ausgleich (Tage, Wochen usw.)

Netzausbau/-neubau

- Ausbau von Drehstromverbund-/Verteilungsnetzen,
- Neubau eines Gleichstromtransportnetzes (Overlay-Netz)

⁹ Wehrmann, E.-A., A. Mbuy & S. Nakhaie: Energiesystemtechnische Aspekte. In: H.-P. Beck, M. Schmidt (Hrsg.): Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Goslar 2011.

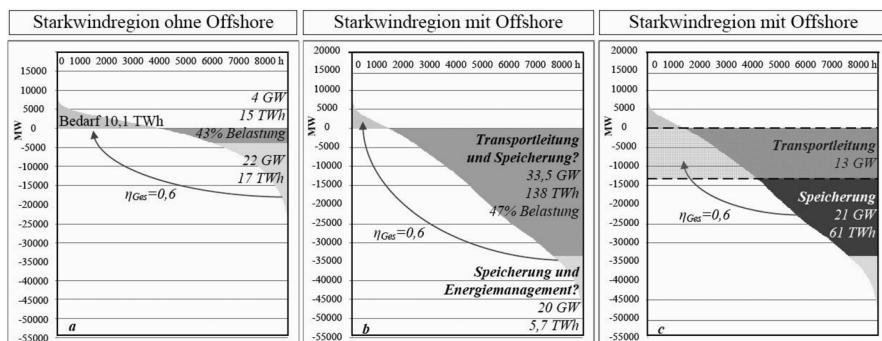


Abbildung 10.

Bei der Modellierung der identifizierten Verteilungsnetzbetreiber und Energieregionen sind zwei Gesichtspunkte von besonderem Interesse. Einerseits kann aus der Betrachtung der Zeitreihen der Austauschleistungen die Höhe der auftretenden Rückspeisespitzen und deren Häufigkeit und Dauer gewonnen werden. Andererseits dient die Betrachtung der Dauerlinie der Ermittlung von Überschuss- und Bedarfsstunden sowie zum Vorschlag von Maßnahmen zur Nutzbarmachung des Überschusses und der Bedarfsdeckung.

Als Beispiel werden die Ergebnisse für die Starkwindregion in 2032 vorgestellt. Dabei ergibt sich, dass eine Rückspeisespitze von 26 GW und eine Überschussenergie von 30,6 TWh zu erwarten sind. Anstatt die gesamte Überschussenergie in das vorgelagerte Netz zu übertragen und damit eventuell Netzengpässe zu verursachen, bietet sich die Möglichkeit, mit regionaler Speicherung den Teil der Überschussenergie zwischenzuspeichern, der in der Region ohnehin gebraucht wird. Durch diese Maßnahme könnte ein massiver Netzausbau verhindert werden. Um dies genauer zu spezifizieren, wird die folgende Beispielrechnung angeführt.

Um den restlichen Eigenbedarf in der Starkwindregion decken zu können, ist bei einem Gesamtspeicherwirkungsgrad von 60% eine Speicherkapazität von 17 TWh erforderlich (Bild 10a). Die übrig bleibende Energie in Höhe von 15 TWh müsste dann mit einer Transportleistung von 4 GW abtransportiert werden. Der Belastungsgrad der Transportleitung läge dann bei 43%, was in etwa dem heute üblichen Wert (47%¹⁰) entspricht.

¹⁰ Oswald, B.R. & L. Hofmann: Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Übertragungstechniken im Höchstspannungsnetz anhand der 380-kV-Leitung Wahle-Mecklar. Hannover 2010.

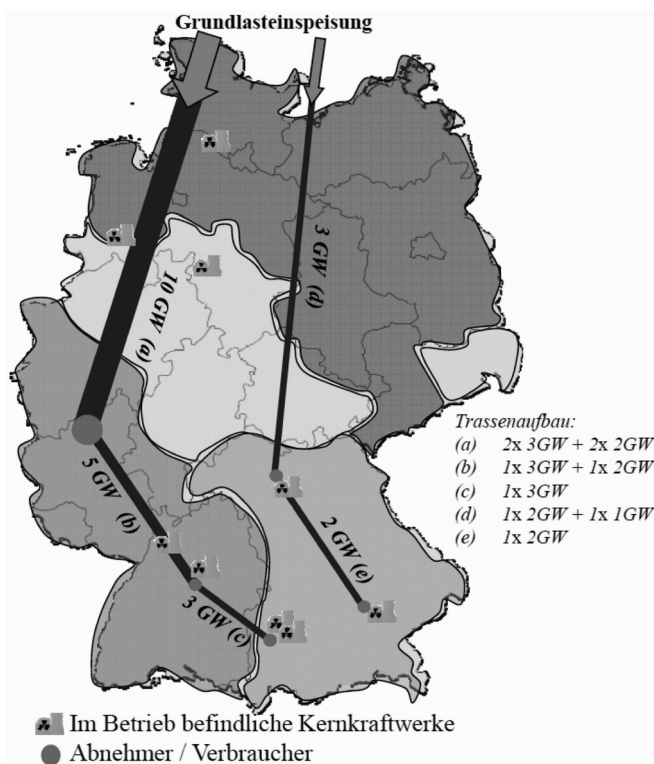


Abbildung 11.

Die Überschussenergie der Starkwindregion wird allerdings erheblich größer, wenn die in der Nord- und Ostsee zu erwartenden Offshore-Windenergieanlagen hinzukommen. Bei rein energetischer Betrachtung der Region ergibt sich eine neue Dauerlinie (Bild 10b), die diesen erheblichen Überschuss ausweist. Beim gleichen Ansatz zum regionalen Energiebedarf wie vorher wären statt 4 GW eine Transportleistung von 33,5 GW notwendig. Nach Hofmann¹¹ ergeben sich daraus rd. 11 HGÜ- Trassen mit je 3 GW Leistung. Der Belastungsgrad beträgt 47% und die erforderliche Trasse hat mindestens eine Breite von 110 m. Um diese relativ große Transportleistung zu reduzieren und gleichzeitig die Auslastung der

¹¹ Hofmann, L.: Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen. Ergebnisbericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie, Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen, Bd. 4.3. Goslar 2012.

Transportleitungen auf 8 760 h zu erhöhen, müssten 61 TWh regional zwischengespeichert werden. In diesem Fall würde die Transportleitung eine Leistung von nur 13 GW benötigen und eine grundlastähnliche Energielieferung am Ende der Leitung ermöglichen (Bild 10c). Auf diese Weise könnte beispielsweise die Gesamtleistung der heute noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke (KKW) von rund 13,7 GW¹² ersetzt werden. Allerdings müssten dann Transportleitungen neu gebaut werden, die die vorhandenen Entfernungen zwischen der Starkwindregion und den Einspeisepunkten der KKW im heutigen Verbundnetz überbrücken. Bild 11 zeigt eine Darstellung, die diesen Gedanken aufgreift. Es wird deutlich, dass zwei von Norden nach Süden verlaufende Transportleitungen notwendig werden, um die Starkwindregion mit den heutigen KKW-Erzeugerschwerpunkten im Süden zu verbinden.

Darüber hinaus besteht gegebenenfalls die Möglichkeit zur Abregelung von Leistungsspitzen, die lediglich in sehr wenigen Stunden des Jahres vorkommen und somit einen verhältnismäßig geringen Energieinhalt aufweisen und einen Abtransport über zusätzliche Übertragungskapazitäten unwirtschaftlich erscheinen lassen. Die zuvor aufgeführten Berechnungen enthalten diese Abregelung nicht, wodurch eine Spitzenleistung von 6 GW mit 300 GWh entsteht (0,4% des Stromverbrauchs der betrachteten Netzbetreiber in der Starkwindregion). Inwieweit eine Abregelung sinnvoll ist oder eher eine Nutzbarmachung von Spitzenleistungen vor Ort erfolgen kann, z.B. durch Installation von Elektrowärmepumpen und Nutzung von Elektroautos, bleibt abzuwarten.

3.2.3. Ausblick

In der vorliegenden, auf Regionen und Spannungsebenen (ÜNB/VNB) bezogenen Untersuchung auf der Basis des Leitszenarios¹³, werden die Austauschleistungen $P_A(t)$ im Jahr 2032 berechnet. Die Berechnungen ergeben teilweise erhebliche Rückspeisespitzen in das Übertragungsnetz, die im Fall der Mitberücksichtigung der Offshore-Windenergieanlagen in der Starkwindregion bei rd. 26 GW liegen.

Um die Stabilität des bestehenden Verbundnetzes aufgrund enormer Rückspeisespitzen nicht zu gefährden, bietet sich die Möglichkeit zur Bündelung und direktem Abtransport dieser Überschussenergie über ein leistungsfähiges Gleichstromtransportnetz (Overlay-Netz) zu den heutigen KKW-Standorten an. Damit die entsprechende Grundlast geliefert werden kann und die Gleichstrom-

¹² Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Konventioneller-Kraftwerkspark (2013).

¹³ Bundesnetzagentur. www.bundesnetzagentur.de (2011).

transportleistungen einen hohen Belastungsgrad (hier 100%) aufweisen, ist eine regionale Speicherung zum Spitzenlastausgleich unabdingbar. Durch eine solche Zwischenspeicherung vor Ort ergibt sich ein minimierter Leitungsaus- bzw. -neubau mit einer Transportkapazität von nur noch 13 GW. Im Vergleich dazu liegt die Gesamtnettoleistung der noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in Deutschland bei rd. 13,7 GW¹².

Um dieses vorliegende Ergebnis weiter zu untermauern, ist es notwendig, die technischen und wirtschaftlichen Parameter der angewandten Speichertechnologien, wie Pump- bzw. Druckluftspeicherwerk sowie das Produktionsmanagement für Bioenergieerzeugung, stromgeführte BHKW, Elektrowärmepumpe usw., in die Untersuchung einzubeziehen.

Darüber hinaus sind Kapazität und optimale räumliche Anordnung der Speicher anhand von Spektralanalysen der Austauschleistungen zu bestimmen. Ziel dabei wäre es auch, unter den Randbedingungen des vorgeschlagenen Overlay-Netzes den Ausbaubedarf im Drehstromverbundnetz für den notwendigen Wirk- und Blindleistungsfluss zu minimieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auch die Umrichterstationen des Gleichstromtransportnetzes an den Einspeisepunkten Blindleistung zur Verfügung stellen können, was ebenfalls zur Reduzierung beim Ausbau des Drehstromübertragungsnetzes führt.

3.3. e-home 2020

Das e-home Energieprojekt 2020 ist ein Verbundprojekt der Avacon AG (AVA) und des EFZN, bei dem zentrale Fragestellungen hinsichtlich des Aufbaus, der Planung und des Betriebs zukünftiger Niederspannungsnetzstrukturen untersucht werden. Es zielt darauf ab, bereits heute die sich aus der Energiewende ergebenden Entwicklungen im Netzplanungsprozess abzubilden und zukünftig relevante Netzstrukturen zu definieren. Dabei berücksichtigt das Projekt auch die technologischen Entwicklungen im Bereich der Netztechnik und untersucht mit unmittelbarem Praxisbezug den Einsatz neuer Technologien zur Spannungshaltung als auch von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT). Im Rahmen des e-home-Projektes finden dabei der regelbare Ortsnetztransformator (rONT) und Breitband-Powerline Anwendung.

Zu diesem Zweck hat AVA in zwei ausgewählten Niederspannungsnetzen insgesamt 32 Haushalte bei der Anschaffung je einer Photovoltaik- und Klimaanlage sowie eines Elektroautos unterstützt. Des Weiteren sind in den ausgewählten Forschungsnetzen der Gemeinden Stuhr und Weyhe komplexe Messinfrastrukturen („Smart Meter“, „PowerQuality“-Messgeräte, „Powerline-Communication“, Datenserver, Datenportal) sowie Prototypen regelbarer Ortsnetztransformatoren installiert worden. Im Ergebnis können die Auswirkungen des veränderten Ein-

speise- und Verbraucherverhaltens auf die Ortsnetze unter realen Bedingungen gemessen und ausgewertet werden.

Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts übernimmt das EFZN im Sinne einer Begleitforschung. Sowohl technische als auch wirtschaftliche, juristische und sozialwissenschaftliche Aspekte werden im Rahmen des e-home-Projekts untersucht. Durch die Nutzung und den Ausbau zwei realer Forschungsnetze zeichnet sich das e-home-Projekt durch einen hohen Praxisbezug aus. Dieser ermöglicht eine Validierung der theoretisch erarbeiteten Ergebnisse mit den gewonnenen Messwerten. So ist es inzwischen in Kooperation mit der Maschinenfabrik Reinhausen gelungen, den rONT zur Serienreife zu bringen.

Im Rahmen dieses Verbundprojektes arbeiten im technischen Bereich das Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia) der TU Braunschweig, das Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) der TU Clausthal sowie das Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH) der Leibniz Universität Hannover zusammen. Im geisteswissenschaftlichen Bereich beteiligen sich das Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER) der TU Clausthal, die Professur für Produktion und Logistik (PPL) der Georg-August-Universität Göttingen sowie das Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB) der TU Braunschweig.

Im technischen Bereich wurde aktuell eine Überarbeitung der bisherigen Erkenntnisse zur Entwicklung der Netzaufgabe auf der Basis von Zeitreihen (Profilen) vorgenommen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Abkehr von 15 Minutenwerten hin zu einer einminütigen Auflösung der generierten Profile. Im Ergebnis wurden neue Algorithmen zur Erzeugung synthetischer Profile für die Komponenten Haushalt allgemein, Elektroauto, Wärmepumpe und Photovoltaikanlage (PV-Anlage) entwickelt. Hierfür sind die zentralen Einflussfaktoren ermittelt und berücksichtigt worden. Zur Nachbildung des Einspeiseverhaltens von PV-Anlagen sind dies exemplarisch die Ausrichtung (Himmelsrichtung), geogr. Lage, Aufstellwinkel, Wetter, Temperatur sowie der Modulwirkungsgrad. Ein Vergleich mit den real gemessenen Profilen wird aktuell durchgeführt.

Im Themengebiet rONT wurden verschiedene Regelalgorithmen untersucht und miteinander verglichen. Ziel ist es, die Wirkung auf das Niederspannungsnetz zu analysieren und die Spannungsspreizung an der Niederspannungsverteilung durch den Einsatz von rONT zu minimieren, um in der Niederspannungsnetzplanung weitere Freiheiten zu erhalten. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass durch die Implementierung eines Reglers mit Zeitverhalten Stufvorgänge durch kurzzeitige Spannungsänderungen vermieden werden können. Bei diesen Reglern ist für die Berechnung der netzplanerischen Freiheiten hinsichtlich des Spannungshubes immer das Band der Schnellrückschaltung zu wählen, da hierdurch die Spannungsextrema an der Niederspannungsverteilung der Ortsnetzstation definiert werden.

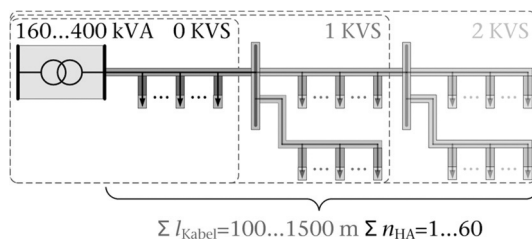


Abbildung 12.

Im weiteren Vorgehen wurde ebenfalls eine lastflussabhängige Sollwertvorgabe untersucht. Um den deutlichen Anstieg der Schaltspielhäufigkeit zu begrenzen, wird im weiteren Verlauf ein Dreipunktglied zur Sollwertvorgabe vorgesehen, um kurzzeitige Sollwertänderungen zu vermeiden bzw. die Flickerstärke zu vermindern.

Neben diesen Untersuchungen wurden auch die Wechselwirkungen mit weiteren Regelkreisen untersucht. Im Speziellen wird der zeitgleiche Einsatz einer Q(U)-Regelung der PV-Anlagen und eines rONT analysiert. In einem Modell aus fünf PV-Anlagen an einer vereinfachten Niederspannungsnetzstruktur wird das Zusammenspiel der Regler getestet. Bisher konnte keine negative Beeinflussung festgestellt werden, wobei diese Aussage jedoch noch nicht abschließend getroffen werden kann.

Im Rahmen des e-home-Projektes werden, um eine Verallgemeinerung der Aussagen vornehmen zu können, neben den realen e-home-Netzen synthetische Netzstrukturen verwendet. Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der diese aus hinterlegten technischen Parametern modelliert, automatisiert Netzberechnungen auf der Basis geeigneter Lastannahmen und gegebenenfalls Netzausbaumaßnahmen durchführt sowie die Ergebnisse für die spätere Auswertung archiviert. Die Berechnungen gliedern sich nach den implementierten Szenarien Photovoltaik (Erzeugungsszenario), Wärmepumpe und Elektrofahrzeug (Lastszenarien), jeweils mit fünf unterschiedlichen Durchdringungen der entsprechenden technischen Komponenten. Neben der Abstimmung dieser Szenarien sind ferner die technischen Parameter und ihre jeweiligen Variationsbreiten an die real anzutreffenden Niederspannungsnetze der AVA angepasst worden. Der prinzipielle Aufbau der synthetischen Netzstrukturen ist Abbildung 3 zu entnehmen.

Da es sich hierbei um eine strangweise Betrachtung handelt, sind die übrigen Niederspannungsabgänge über entsprechende Ersatzlasten an der Transformatorsammelschiene abgebildet worden. Zur Bildung der Ersatzlasten wird als Eingangsparameter die spezifische Transformatorleistung je Hausanschluss

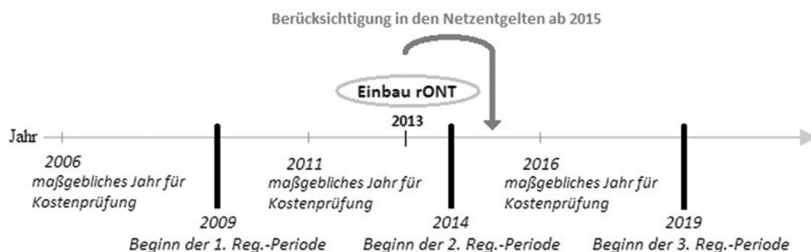


Abbildung 13.

herangezogen und ebenfalls in mehreren Schritten variiert. Durch diese Vorgehensweise ist weiterhin eine Rekombination der untersuchten Stränge zu umfänglichen Ortsnetzen möglich.

Werden vorgegebene Grenzwerte überschritten, muss das Netz ausgebaut werden. Dazu sind zwei Ansätze möglich:

Methode 1 – klassische Netzverstärkung (wenn die Lastflussberechnung thermische Betriebsmittelüberlastungen feststellt, wird ein leistungsstärkerer Ortsnetztransformator verbaut und/oder der Leiterquerschnitt vergrößert, beziehungsweise ein Parallelkabel gelegt),

Methode 2 – regelbarer Ortsnetztransformator und Netzverstärkung (wenn die Notwendigkeit besteht, wird ein rONT verbaut beziehungsweise werden analog zur Methode 1 die Leitungen zusätzlich verstärkt).

Um einen effizienten und zukunftsweisenden Netzausbau sicherzustellen beziehungsweise den notwendigen Kapitaleinsatz entsprechend zu gestalten, müssen die technisch umsetzbaren Konzepte bewertet werden. Anhand ökologischer, ökonomischer, technischer und sozialer Kriterien wird das Einsatzpotential des rONT gegenüber einem konventionellen Netzausbau bestimmt. In den letzten Monaten sind dabei in einem intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern die Bewertungskriterien sowie deren Gewichtung festgelegt worden.

Die Bewertung der beiden Netzausbauvarianten erfolgt über das Outranking-Verfahren PROMETHEE, bei dem für jede synthetische Netzstruktur eine Rangordnung der beiden Netzausbauvarianten (konventionell beziehungsweise mit rONT) durch paarweise Vergleiche der Alternativen für jedes Bewertungskriterium erstellt wird. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann dem Netzbetreiber eine Empfehlung gegeben werden, welche Netzausbauvariante unter Berücksichtigung der ökologischen, ökonomischen, technischen und sozialen Bewertungskriterien zu bevorzugen ist.

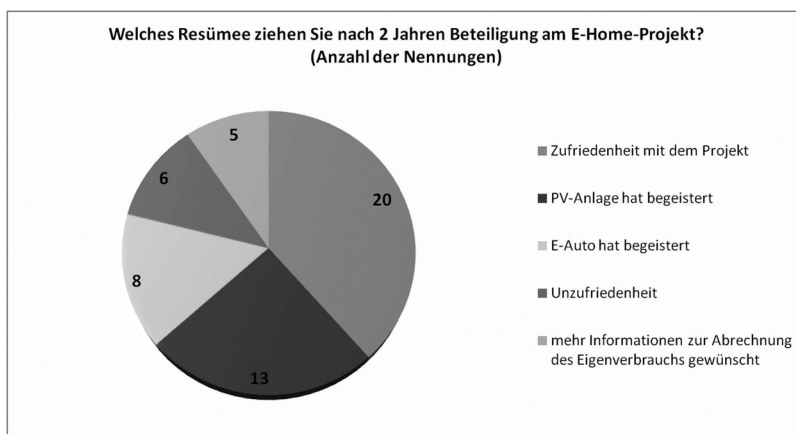


Abbildung 14.

Die juristische Begleitforschung untersuchte in den zurückliegenden Monaten unter anderem die Anerkennung bestimmter Kostenpositionen, wie die Kosten für „Smart Metering“ und rONT, in der Anreizregulierung. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Kosten für einen rONT höher sind als die eines konventionellen Transformators. Sie sind ein Teil der Netzkosten und unterliegen als beeinflussbare Kosten dem Effizienzvergleich. Dort wirken sie sich kurzfristig negativ, langfristig jedoch positiv auf die Erlösobergrenze des Netzbetreibers aus, sofern sie zukünftig Netzausbaukosten einsparen. Nach dem Grundsatz der Anreizregulierung werden die Kosten für rONT mit mehrjährigem Zeitversatz erstmals in den Netzentgelten berücksichtigt. Durch die Länge der Regulierungsperioden kann ein Zeitversatz von bis zu sieben Jahren entstehen. Im Rahmen des Projektes werden verschiedene Möglichkeiten wie zum Beispiel die Anwendung des Erweiterungsfaktors zur Reduzierung dieses Zeitversatzes diskutiert und deren Anwendung unter Berücksichtigung der regulatorischen Restriktionen für möglich gehalten.

Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung wurde eine weitere Studie zur Akzeptanz und Zufriedenheit der am Projekt beteiligten Personen durchgeführt. 29 von 32 Teilnehmern waren zu einem Interview bereit, um Fragen zum Projekt zu beantworten. Die Mehrheit zieht ein positives Resümee aus den vergangenen zwei Projektjahren und zeigt (technisches) Interesse, besonders die PV-Anlage wird positiv bewertet. Jedoch wünschen sich die Teilnehmer mehr Informationen, zum Beispiel zur Bedienung der „Smart Meter“ oder technische Daten zur Klimaanlage. Durch das Projekt haben viele Teilnehmer ihr Verbrauchsverhalten in Richtung der Eigenverbrauchsoptimierung verändert. So werden

elektrische Geräte zur Nutzung der eigenerzeugten Energie gezielt dann in Betrieb genommen, wenn die Sonne scheint.

Das Projekt wurde im August 2013 um weitere drei Jahre verlängert. Als zusätzliches Element wird AVA den teilnehmenden Haushalten die Integration eines Batteriespeichers anbieten. Die sich hieraus ergebenden technischen, rechtlichen, ökonomischen und sozialwissenschaftlichen Fragestellungen werden zentraler Bestandteil der weiteren wissenschaftlichen Begleitforschung sein.

4. Fazit

Die dargestellten Forschungsbeispiele zeigen die Vielseitigkeit und problemorientierte Flexibilität der Struktur des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen auf. Der transdisziplinäre Gedanke ermöglicht es, spezifischen Problemen auf den Grund zu gehen und die gewonnen Erkenntnisse in die ganzheitliche Struktur der Energiewissenschaften einzuflechten. Nur so ist es möglich, diese gesamtgesellschaftlich gewinnbringend einzusetzen.

Die drei Forschungsbeispiele zeigten an verschiedenen Stellen auf, wie die Veränderung bzw. die Optimierung einzelner Parameter entscheidende Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben können. Sei es die Schaffung von wirtschaftlichen Anreizen zum Ausbau von Batteriespeichern, um Mittelfristig die Netzstabilität zu erhalten, der Ausbau von Stromautobahnen zur Erschließung weiterer regenerativer Energiequellen oder das sich veränderte Verhalten von Konsumenten durch die Bereitstellung eigener Energieversorgungsquellen. Diese sind nur jeweils ein Beispiel aus den vorgestellten Forschungsprojekten, die aber einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen der Energiewende sein können. Erschlossen wurden Sie durch eine transdisziplinäre Betrachtung des Themenfeldes.

Die Langfristigkeit der gesamtgesellschaftlichen Aufgabe der Energiewende impliziert, dass solche Betrachtungen auch zukünftig von höchster Wichtigkeit sein werden. Das EFZN leistet einen dauerhaften Beitrag zur Entwicklung der transdisziplinären Forschung entlang der gesamten Energieprozess- und Energiewertschöpfungskette und ermöglicht dies.

Modelle und Typen in der Rechtswissenschaft*

OTTO LUCHTERHANDT

Im Wendischen Dorfe 28, D-21335 Lüneburg

A. Einleitung: Theoretische Vorbemerkungen

Modelle und Typen sind theoriebildende Generalisierungen, Abstraktionen, welche die große Fülle von Einzelheiten individueller Erscheinungen auf Charakterzüge und Strukturelemente reduzieren, die mit Blick auf ihren Zweck im Verfahren der Modell- und der Typenbildung für wesentlich gehalten werden. Es geht um die vielberufene Reduktion von Komplexität zur Schaffung von Ordnung, um die Klärung von unübersichtlichen Wirklichkeiten und Objekten, letztlich um die Gewinnung von Erkenntnis. Dafür besteht in den Naturwissenschaften und Ingenieurwissenschaften, in den Geisteswissenschaften und in den Sozialwissenschaften gleichermaßen ein großes Bedürfnis.

Im Prinzip gilt das auch für die Rechtswissenschaft, ja für sie wohl in starkem Maße, denn sie ist in allen ihren Teilbereichen in hervorstechender Weise an Systembildung interessiert, auf Systembildung ausgerichtet und auf Systembildung um ihrer Leistungsfähigkeit willen angewiesen; ganz besonders gilt das naturgemäß für die Grundlagen und damit auch für die Grundlagenfächer der Rechtswissenschaft¹, d.h. für die Rechtstheorie, die Rechtsphilosophie, die Rechtsgeschichte und die Rechtssoziologie, aber auch für die Rechtsetzung (Gesetzgebung) sowie die Anwendung und Interpretation des geltenden Rechts, sei es durch die Bürger und ihre Organisationen, durch die Rechtsanwälte, durch die Behörden, durch die Gerichte und, nicht zuletzt, auch für die an den juristischen Fakultäten in Forschung und Lehre tätigen Rechtswissenschaftler.

Es kann daher nicht verwundern, dass die Rechtswissenschaft und ihre Teildisziplinen, die Rechtstheorie ebenso wie die dogmatisch betriebene Rechtslehre, eine Terminologie, d.h. Rechtsbegriffe, entwickelt haben, die mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden Funktionen erfüllen, denen im Prinzip auch die Bildung von Modellen und Typen dient. Ich zähle die wichtigsten dieser Kategorien auf, bei denen es sich zugleich um Grundbausteine der Rechtswissenschaft handelt:

* Der Vortrag wurde am 11.10.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

¹ Dazu statt vieler nur Dreier, Ralf: Was ist und wozu Allgemeine Rechtstheorie?, in: derselbe: Recht-Moral-Ideologie. Studien zur Rechtstheorie, Frankfurt/M 1981, S. 17–47.

(1) die **Rechtsnorm** oder **Rechtsregel**, d.h. die in einer Rechtsvorschrift (Artikel; Paragraph) enthaltende verbindliche, abstrakt-generell formulierte Verhaltensbestimmung in Gestalt eines sogenannten Tatbestandes;

(2) das **Rechtsprinzip**, z.B. das Rechtsstaatsprinzip, die Menschenwürde, das Sozialstaatsprinzip, das heißt hochabstrakte, meist in der Verfassung verankerte Rechtsideen, die entweder durch Konkretisierung im Zuge ihrer Anwendung die Quelle von Rechtsnormen (Rechtsregeln) sein können, unter Umständen aber auch schon selbst Rechtsnormen sind (wie z.B. die Grund- und Menschenrechte) und komplexe Steuerungsfunktionen erfüllen;

(3) das **Rechtsinstitut**, d.h. ein Inbegriff, die Gesamtheit von Rechtsnormen, die ein komplexes Rechtsgebilde regeln und ihm ein spezifisches Profil geben, z.B. das Eigentum, das Erbrecht, die Ehe, die Rundfunkanstalt, die kommunale Gebietskörperschaft, die Verfassungsgerichtsbarkeit usw.

(4) die **Rechtsformen**, d.h. bestimmte juristische Grundphänomene, die ein Rechtsgebiet, sei es das Zivilrecht, das Wirtschaftsrecht, das Verwaltungsrecht, das Strafrecht oder das Strafprozessrecht usw., systematisch strukturieren. Beispiele sind der Vertrag im Privatrecht oder der Verwaltungsakt im öffentlichen Recht (Verwaltungsrecht);

(5) das **System**. Es hat den Charakter einer juristischen Globalkategorie und wird daher in der Regel auf komplexe Phänomene angewendet, um sie systematisch zu gliedern und ihre rechtliche Bedeutung in wesentlichen Hinsichten darzustellen. Ein Beispiel dafür sind die dem Individuum gegen den Staat zustehenden Grundrechte mit ihren unterschiedlichen Funktionen: (Rechte zur Abwehr ungerechtfertigter staatlicher Eingriffe in Freiheit und Eigentum; Rechte auf politische Mitwirkung; Rechte auf Schutzmaßnahmen des Staates zur Abwehr von Rechtsverletzungen von Seiten der Mitmenschen; Rechte gegen den Staat auf soziale Leistungen. Man spricht von einem „System“ der Grund- und Menschenrechte.

Relativ verbreitet ist auch der Begriff des Typus in der Rechtswissenschaft. Auf ihn werde ich gleich ausführlicher eingehen. Zuvor ist aber festzustellen, dass der Begriff des „Modells“ insgesamt gesehen nur eine geringe Rolle in der Rechtswissenschaft spielt. Im deutschsprachigen Raum ist nur gelegentlich und eher zufällig und auch erst in der neueren Rechtsliteratur von Modellen die Rede², im angelsächsischen Raum ist seine Verwendung häufiger anzutreffen. Als eine eingeführte Grundkategorie findet sich das Modell weder in den

² Siehe etwa Alexy, Robert: Theorie der Grundrechte, Baden-Baden 1985, S. 104 ff (Struktur der Grundrechtsnormen), S. 164 ff (Grundrechte als subjektive Rechte).

Grundrissen und Lehrbüchern der Rechtstheorie im Allgemeinen³ noch in den systematischen Darstellungen der juristischen Methodologie im Besonderen⁴. Die juristische Literatur vermittelt vielmehr den Eindruck, dass dort, wo von „Modell“ gesprochen werden könnte, andere, seit langem etablierte juristische Begriffe verwendet werden, insbesondere System, Rechtsinstitut, Rechtsform oder auch Rechtstypus. In den Handwörterbüchern zur Rechtswissenschaft findet sich der Begriff „Modell“ ebenso wenig wie in den Sachregistern der Standardliteratur.

B. Der Typus in der Rechtswissenschaft

Die Kategorie des „Typus“ ist in der Rechtswissenschaft seit über 100 Jahren in Gebrauch⁵. Einen nicht zu übersehenden Einfluss hat insofern *Max Webers* Lehre vom „Idealtypus“⁶ ausgeübt, allerdings in einer eher allgemeinen Hinsicht⁷. *Max Weber* war zwar von Haus aus Jurist und hat sich in seinem gesamten Werk immer wieder intensiv mit dem Recht und dessen Phänomenen beschäftigt, insbesondere in großem Umfang rechtsgeschichtliche und rechtssoziologische Studien betrieben⁸, aber sein Erkenntnisinteresse galt der sozialen Wirklichkeit. Sie wollte er verstehen.

Soziologie bestimmte *Weber* als „eine Wissenschaft, welche soziales Handeln deutend verstehen und dadurch in seinem Ablauf und seinen Wirkungen ursächlich erklären will“⁹. Um nun das Verstehen von Kausalzusammenhängen des Handelns bei komplexen sozialen Vorgängen und Ereignissen systematisch zu ermöglichen, fragt *Weber* zunächst danach, wie bei einem streng zweckrational bestimmten Handeln aller Beteiligten das Geschehen abgelaufen wäre. Er bildet also eine Hypothese. Bewusst klammert er dabei alle emotionalen, affektiven und sonstigen irrationalen Faktoren aus, die auf das Handeln (auch) einwirken. Diese hypothetische Konstruktion eines allein von sinngebender Rationalität gesteuert-

³ Rütters, Bernd/Fischer, Christian/Birk, Axel: Rechtstheorie mit Juristischer Methodenlehre, 7. Auflage, München 2013; Müller, Friedrich: Strukturen der Rechtslehre, Berlin 1984; Röhl, Klaus F.: Allgemeine Rechtslehre. Ein Lehrbuch, Köln usw. 1994; Mahlmann, M.: Rechtsphilosophie und Rechtstheorie, 2. Auflage, Baden-Baden 2012; Larenz, K./Canaris, C.-W.: Methodenlehre der Rechtswissenschaft, 3. Auflage, Berlin 1995.

⁴ Larenz, K./Canaris, C.-W.: Methodenlehre der Rechtswissenschaft, 3. Auflage, Berlin 1995.

⁵ Jellinek, Georg: Allgemeine Staatslehre, 1. Auflage, Berlin 1900, S. 30 ff.

⁶ Wirtschaft und Gesellschaft, Tübingen 1922, § 1.

⁷ Zu Webers Einfluss auf die Geschichtswissenschaft siehe Schieder, Theodor: Der Typus in der Geschichtswissenschaft, in: Schmidt, Robert H. (Hrsg.): Methoden der Politologie, Darmstadt 1967, S. 108–123 (Wege der Forschung, Bd. LXXXVI).

⁸ Weber, Max: Rechtssoziologie. (Aus dem Manuskript herausgegeben und eingeleitet von Johannes Winckelmann), Neuwied 1960.

⁹ Wirtschaft und Gesellschaft, Paderborn o.J., S. 11/12.

ten und auf ihr beruhenden Kausalzusammenhanges nennt *Weber Idealtypus*. Als abstrakter Typus konstruiert werden dabei sowohl die Akteure als auch der subjektive Sinn, den sie ihrem Handeln beilegen.

Der Vergleich zwischen dem Idealtypus und dem realen Geschehensablauf macht den Abstand zwischen Idealtypus und dem untersuchten Realitätsausschnitt, zugleich aber auch die irrationalen Faktoren sichtbar, welche die Abweichungen verursacht haben. Der Vergleich erleichtert es, die Ursachenketten und ihre bestimmenden Faktoren klarer zu erkennen und zu bewerten¹⁰.

Der Idealtypus ist ein reines Gedankengebilde, ein Konstrukt, das es ermöglichen, jedenfalls erleichtern soll, die unendliche Vielfalt und verwirrende Mannigfaltigkeit der sozialen Erscheinungen aus Geschichte und Gegenwart zu analysieren, zu ordnen und zu verstehen. Zugleich hat die Bildung von Idealtypen den Zweck, den von der Soziologie verwendeten Kategorien und Begriffen Klarheit, Genauigkeit und Eindeutigkeit zu geben. Bewusst hat *Max Weber* daher die idealtypische Methode an den Anfang seiner Darlegung der „soziologischen Grundbegriffe“ gestellt.

Idealtypen können sowohl einzelne soziale Akteure sein, z.B. der Unternehmer, der ehrbare Kaufmann, der Bankier oder der Hausvater, als auch komplexe soziale Gebilde und Organisationen, wie etwa der Wirtschaftsbetrieb, die Genossenschaft, die Aktiengesellschaft oder der Staat. Sie sind jedoch nicht als Idealgestalten oder soziale Vorbilder zu verstehen; der Idealtypus ist nicht normativ gemeint, sondern er fungiert als abstrakter Maßstab zur adäquaten Erfassung und Beschreibung von sozialer und politischer Wirklichkeit. Der Idealtypus in der soziologischen Theorie Webers hat keine präskriptive, normative, sondern eine heuristische Funktion.

Obwohl nicht normwissenschaftlich, sondern wirklichkeitswissenschaftlich¹¹ ausgerichtet, hat *Webers* Methode der Bildung von Idealtypen auf die Rechtswissenschaft starken Einfluss ausgeübt.

Das gilt insbesondere für die Allgemeine Staatslehre, die der Sache nach zwar eher der Politikwissenschaft und namentlich der Vergleichenden Regierungslehre zuzuordnen ist, aber seit über hundert Jahren eine Standarddisziplin im Curriculum der rechtswissenschaftlichen Fakultäten ist¹². Dementsprechend hat *Hans Julius Wolff*, einer der bedeutendsten Rechtstheoretiker und Verwaltungsrechtler zwischen 1930 und 1960, „die Typenbildung in der allgemeinen Staatslehre, in der Rechtsgeschichte und in der Rechtsvergleichung“ als erste von vier Verwen-

¹⁰ A.a.O. S. 13 ff.

¹¹ Zu diesem Begriff und Ansatz einprägsam auch Heller, Hermann: Staatslehre, hrsg. von Gerhart Niemeyer, Leiden 1934, S. 37 ff.

¹² Zippelius, Reinhold: Allgemeine Staatslehre. Politikwissenschaft, 13. Auflage, München 1999, S. 11 ff.

dungsarten des Typus in den Rechtswissenschaften herausgestellt¹³. Die zweite von ihm genannte Verwendungsart des Typus in der Rechtswissenschaft ist wohl die wichtigste: es ist die der juristischen Systematisierung dienende allgemeine rechtliche Typenbildung. Auf sie werde ich mich hier konzentrieren und zugleich auch beschränken.

Die juristische Typenbildung ist in den drei Haupt- und Kerngebieten der Rechtsordnung – im Zivil- und Wirtschaftsrecht, im Öffentlichen Recht und im Strafrecht – etabliert und weit verbreitet¹⁴. Typenbildung und Typisierung dienen mehreren Zwecken: 1. der Klassifizierung und damit der Systematisierung von Rechtsgebilden, 2. der Konkretisierung hochabstrakter, allgemeinerer Rechtsbegriffe, um ihnen Anschaulichkeit zu vermitteln, und 3. der Normierung von Standards sozialen Verhaltens, als deren Subjekt und Adressat ein abstrakter juristischer Durchschnittstyp figuriert.

Zu 1: Klassifizierung von Rechtsgebilden

(1) Als Beispiel seien aus dem *Staats- und Verfassungsrecht* die Typen von Verfassungsvorschriften, man könnte auch „Arten“ sagen, genannt. Es werden unterschieden:

Staatsstrukturbestimmungen (Rechtsstaat; Demokratie; Bundesstaatlichkeit);

Grundrechte (Menschenrechte; Bürgerrechte);

Grundpflichten;

Verfahrensregelungen;

Kompetenzbestimmungen (Organkompetenzen; Verbandskompetenzen) und Zuständigkeitsregelungen;

Übergangsregelungen und Schlussbestimmungen.

Maßgebendes Kriterium für die Typenbildung sind die normativen Funktionen, welche die Bestimmungen bei der Ausführung und dem Vollzug der Verfassung erfüllen.

(2) Aus dem *Verwaltungsrecht* sei zur Illustration die Klassifizierung von Verwaltungsakten, d.h. von konkret-individuellen Entscheidungen einer Behörde im

¹³ H.J. Wolff, Typen im Recht und in der Rechtswissenschaft, in: Studium generale Heft 5 (1952), S. 195–205.

¹⁴ Larenz, Karl: Methodenlehre der Rechtswissenschaft, 4. Auflage, Berlin usw. 1979, S. 443 ff.; Leenen, Detlef: Typus und Rechtsfindung, Berlin 1971.

Einzelfall (z.B. Baugenehmigung) herangezogen. Entsprechend den Auswirkungen auf das mögliche Verhalten derjenigen, an die solche Akte gerichtet werden, unterscheidet man:

- Verbote und Gebote (zu einem Tun oder Unterlassen),
- Erlaubnisse und Genehmigungen,
- Feststellungen, die rechtliche Folgen oder Wirkungen haben (z.B. Erklärung eines Objekts zum Denkmal),
- Duldungsbefehle (z.B. das Abschleppen des Autos hinzunehmen) und
- Gestaltungsakte (Ernennungen; Verleihungen).

Maßgebendes Kriterium für die typisierende Differenzierung der Verwaltungsakte ist die Wirkung, die sie jeweils auf die konkrete Rechtslage und den Status des in dem Verwaltungsakt genannten Adressaten haben.

(3) aus dem *Privatrecht (Zivil- und Wirtschaftsrecht)*:

Die Rechtsgeschäfte werden klassifiziert in: einseitige Rechtsgeschäfte (z.B. Kündigung) und mehrseitige Rechtsgeschäfte (Verträge; Gesamtkte, d.h. z.B. Beschlüsse von Mitgliedern einer Gesellschaft).

Zu 2: Typenbildung zur Konkretisierung abstrakter, allgemeiner Rechtsbegriffe

Als Beispiel sei das Rechtsinstitut des privatrechtlichen Vertrages herausgegriffen. Der Vertrag als solcher ist definiert als die Übereinstimmung zweier Willenserklärungen in Bezug auf einen bestimmten Inhalt. Darunter fallende Vertragstypen, die diese abstrakte Definition konkretisieren, sind nun: Kauf- und Tauschverträge; Miete; Pacht; Darlehen; Leasing; Schenkung; Leihe; Gesellschaftsverträge; Versicherung; Werkverträge; Dienstverträge, Maklerverträge usw. Dies sind reine Typen, die gesetzlich geregelt sind. Darüber hinaus kann es Mischungen zwischen den Typen geben, um den mannigfachen Bedürfnissen des Rechtsverkehrs gerecht zu werden und den Interessen seiner Teilnehmer – natürlichen und juristischen Personen – maßgeschneidert zu entsprechen. Einen *numerus clausus* von Verträgen gibt es daher nicht. Es gilt der Grundsatz der Vertragsfreiheit.

Die Typisierung der schuldrechtlichen Verträge des Privatrechts macht den Sinn und Zweck der Typenbildung in der Rechtswissenschaft sehr deutlich: Es geht darum, zwischen der obersten Ebene des abstrakten und unanschaulichen Begriffs des Vertrages und der untersten Ebene der zwischen zwei oder mehreren Personen geschlossenen konkreten Vereinbarung eine rechtlich vermittelnde, mittlere Ebene abgeschwächter Abstraktheit einzuziehen. Dies sind die vom Gesetzgeber in den

großen Kodifikationen seit dem Ende des 18. Jahrhunderts typisierten Verträge. Sie haben sich in aller Regel im praktischen Rechtsverkehr des Alltags herausgebildet und können meist auf eine sehr lange, nicht selten in das Römische Recht zurückreichende Geschichte blicken¹⁵. Für ihre Normierung besteht nicht nur ein Bedürfnis in der Wissenschaft, namentlich in der Theorie- und Begriffsbildung des Privatrechts, sondern auch, ja nicht weniger in der Rechtspraxis, sei es der Gesetzgebung bzw. Rechtsetzung oder in der Rechtsanwendung durch Bürger, Unternehmen, Behörden und Gerichte.

Zu 3: Normierung von Standards sozialen Verhaltens, als deren Subjekt und Adressat ein abstrakter Durchschnittstyp figuriert

Insbesondere im Privatrecht wird etwa bei Anforderungen an die Verkehrssicherungspflicht auf den Typ eines „durchschnittlichen“, d.h. eines gewöhnlichen Hauseigentümers abgestellt. Typisierungen sind z.B. im Sachenrecht der „Besitzdiener“, das heißt die weisungsgebundene Hausangestellte, die wegen ihrer Unselbständigkeit keinen Besitz hat, der Tierhalter, der Handelsvertreter usw. Es wird also eine Personengruppe genannt, an deren Vertreter durchschnittliche Pflichten und Funktionsanforderungen gestellt werden.

Die Typenbildung wirkt sich positiv auf die Auslegung des Gesetzes aus, weil sie erstens die Identifizierung von *atypischen* Sachverhalten erleichtert und zweitens das entscheidende Argument dafür liefert, atypische Sachverhalte aus dem Normbereich der zu interpretierenden Gesetzesbestimmung auszuschließen.

C. Modelle in der Rechtswissenschaft

a. Das syllogistische Rechtsanwendungsmodell

In der Rechtsanwendung gibt es ein vor allem die richterliche Tätigkeit seit alters her beherrschendes Modell, nämlich den Vorgang der *Subsumtion*, d.h. die Einordnung eines konkreten Lebenssachverhaltes unter eine abstrakt-generelle Rechtsvorschrift, die eine bestimmte Rechtsfolge anordnet¹⁶. Es handelt sich um den berühmten *Syllogismus* bei der Anwendung eines Gesetzes in drei Schritten oder Sätzen. Ich möchte ihn an einem Schulbeispiel illustrieren,

¹⁵ Honsell, Heinrich: Römisches Recht, 2. Auflage, Berlin usw. 1992, S. 107 ff.

¹⁶ Rütters/Fischer/Birk, Rechtstheorie (Anm. 3), Rdn. 677 ff (S. 403 ff); in die Tiefe gehend: Gabriel, Gottfried: Subsumierende und reflektierende Urteilskraft, in: Gabriel, Gottfried/ Gröschner, Rolf (Hrsg.): Subsumtion. Schlüsselbegriff der Juristischen Methodenlehre, Tübingen 2012, S. 1–23 (m.w.N.).

nämlich an dem Fall des Mordes, dessen Tatbestand in § 211 Strafgesetzbuch (StGB) geregelt ist.

(1) Der 1. Satz in dem Syllogismus, **Obersatz** genannt, ist die vom Gesetz gelieferte abstrakte Bestimmung, wer „Mörder“ ist: § 211 Abs. 2 StGB lautet:

„Mörder ist, wer aus Mordlust, zur Befriedigung des Geschlechtstriebes, aus Habgier oder sonst aus niedrigen Beweggründen, heimtückisch oder grausam oder mit gemeingefährlichen Mitteln oder um eine andere Straftat zu ermöglichen oder zu verdecken, einen Menschen tötet.“

Der Obersatz ist also der vom Gesetz bestimmte **Tatbestand**, in diesem Falle des Mordes.

(2) Der zweite Satz, man spricht vom **Untersatz**, lautet: Hans Meier hat den ahnungslosen Heinrich Müller von hinten mit einem Messer erstochen und ihn seines Geldes beraubt.

Satz 2 stellt den konkreten **Sachverhalt** des zu entscheidenden Falles, dar, der sich tatsächlich abgespielt hat und dessen Einzelheiten nach den Vorschriften des Strafprozessrechts ermittelt, festgestellt und notfalls bewiesen worden sind. Auf ihn ist der Obersatz anzuwenden.

(3) Der dritte Satz, der als **Schluss-Satz** bezeichnet wird, lautet: Hans Meier ist ein Mörder, weil er Heinrich Müller heimtückisch und aus Geldgier getötet hat. Die Ziehung des Schlusses setzt voraus, dass der Vergleich zwischen Tatbestand und Sachverhalt eine Kongruenz ergibt.

Damit ist der gesetzliche Tatbestand des § 211 StGB erfüllt. Die sich daraus ergebende **Rechtsfolge** ordnet § 211 Abs. 1 an: „Der Mörder wird mit lebenslanger Freiheitsstrafe bestraft.“

Das **syllogistische Rechtsanwendungsmodell**, das auf *Aristoteles* zurückgeht¹⁷ und sich, philosophisch betrachtet, im Schnittbereich von Logik und Jurisprudenz befindet, gehört in theoriegeschichtlicher und zugleich methodologischer Hinsicht zum Kern des sogenannten **Rechtspositivismus**, der in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts unter anderem auch in Deutschland zur führenden geistigen und methodologischen Richtung in der Rechtswissenschaft wurde und im sogenannten **Gesetzespositivismus** eine äußerste Zuspitzung erfuhr¹⁸.

Einer seiner Grundsätze war und ist, dass das Recht aus Normen besteht, die von einer dazu ermächtigten Instanz gesetzt sind, dass sie daher gelten und verbindlich

¹⁷ Rüßmann, Helmut: Syllogistik des Aristoteles, bei: ruessmann.jura.uni-sb.de/Lehre; Zantwijk, Temilo van: Subsumtion in aristotelischer Tradition, in: Gabriel/ Gröschner, Subsumtion (Anm. 16), S. 25–42 (28 ff.).

¹⁸ Rütters/Fischer/Birk, Rechtstheorie (Anm. 3), Rdn. 470 ff (S. 291 f).

sind. Die Rechtsordnung wird als systematischer Zusammenhang positiv gesetzter Rechtsnormen verstanden, denen ein vernünftiger Sinn innewohne und die es kraft ihrer – angeblichen bzw. behaupteten – Lückenlosigkeit möglich machten, jeden Fall der Lebenswirklichkeit zu entscheiden.

Den Sinn zu erschließen ist Aufgabe vor allem der Richter. Die ihnen obliegende Auslegung der Gesetze geschieht nach vier (weltweit anerkannten) Interpretationsregeln¹⁹: 1. nach der grammatikalischen oder verbalen Auslegung, d.h. der sich auf den Wortlaut konzentrierenden und auf ihn stützenden Methode; 2. nach der historischen Methode, die auf den Willen und die Motive des Gesetzgebers als des Urhebers der Norm abhebt; 3. nach der systematischen Methode, die den Sinn der Norm aus ihrer Platzierung und Stellung im Gesetzestext und aus dem systematischen Aufbau des Gesetzes insgesamt zu erschließen sucht, sowie 4. nach der teleologischen Auslegungsmethode, die nach dem Zweck der Vorschrift selbst, nach ihrem unter Umständen verborgenen Sinn, d. h. danach fragt, was das Gesetz vernünftigerweise will und worauf es objektiv abzielt. Diese in der Rechtswissenschaft bis heute absolut herrschenden Auslegungsregeln stellen keine Alternativen dar, sondern werden nebeneinander und kumulativ angewendet.

Nun gehört es zu den Grundsätzen des Rechtspositivismus, dass er aus dem Geltungsbereich des Rechts und der Beschäftigung mit ihm alle Ideen, Prinzipien, Regeln und Normen verbannt und ausschließt, die sich nicht auf ein Gesetz gründen, sondern lediglich in Moral und Sitte, in sozialen oder philosophischen Ideen oder Forderungen wurzeln, die also außerrechtlicher, metajuristischer Natur sind.

Der amerikanische Rechtsphilosoph *Ronald Dworkin* hat das skizzierte, auch im angelsächsischen Raum stark vertretene positivistische Grundverständnis von Recht als ein „Regelmodell“ bezeichnet. Er hat das positivistische Regelmodell in seinem bedeutendsten Werk „Taking Rights seriously“²⁰ einer fundamentalen Kritik unterworfen und ein anderes, eigenes „Regelmodell“ dagegen gesetzt.

Dworkin geht dabei von Fällen aus, bei deren Lösung sich der Richter zwar auf keine gesetzte Rechtsnorm stützen kann, weil eine solche fehlt, die Notwendigkeit einer richterlichen Entscheidung aber unabweislich ist. Er exemplifiziert die Schwäche des positivistischen Rechtsmodells an dem von einem US-amerikanischen Gericht zu entscheidenden Fall, dass ein testamentarisch eingesetzter Erbe den Erblasser umbrachte. Zwar stand ihm wegen des dadurch eingetretenen Erbfalls nach dem geltenden positiven Recht die Erbschaft zu, der Richter sah sich aber dem ungeschriebenen, freilich nur sittlich begründeten Prinzip gegen-

¹⁹ Kritisch reflektierend: Rüthers/Fischer/Birk, Rechtstheorie (Anm. 3), Rdn. 696 ff (S. 411 ff.) m.w.N.

²⁰ Harvard University Press 1978; deutsch: Bürgerrechte ernst genommen, Frankfurt/ M 1984, S. 42 ff; 91 ff.

über, dass niemand einen Vorteil aus einem von ihm begangenen Unrecht oder gar Verbrechen erlangen dürfe. Obwohl nur sittlicher Natur, zwingt das Prinzip dazu, den Mörder von der Erbschaft auszuschließen. Dieses moralische Prinzip verwandele sich im Wege und kraft der Ermächtigung des Richters zur Rechtsfortbildung in ein Rechtsprinzip²¹.

An solche Konstellationen anknüpfend, vertritt *Dworkin* die Meinung, dass wesentlicher Teil, ja die eigentliche Grundlage jeder Rechtsordnung elementare moralische und ethische Prinzipien seien wie z.B. die Menschenwürde und die rechtliche Gleichheit aller Menschen. Aus ihnen ließen sich subjektive Ansprüche ableiten, namentlich das Recht des Menschen auf Achtung seiner Würde oder das Recht auf gleiche Rücksichtnahme und Respekt.

b. Ein Beispiel früher Modellbildung – die Staatsformenlehre

Beispiele für Modelle finden sich – schon seit langem – auch in der Staatslehre, in der Verfassungstheorie und in der Verfassungsrechtslehre, wenngleich davon nicht ausdrücklich die Rede war. So kann man der Modellbildung und dem Denken in Modellen die klassische Lehre von den **Staatsformen** und ihren Abwandlungen zurechnen. Sie reicht bekanntlich in die Antike, auf *Aristoteles* und *Cicero*, zurück²². Gemeint ist die Unterscheidung zwischen den guten Staatsformen Monarchie, Aristokratie, Demokratie einerseits und ihren Entartungen in Gestalt der Tyrannis, der Oligarchie und der Ochlokratie, also der Herrschaft des Pöbels, der Massen, andererseits. *Macchiavelli* hat aus der Erfahrung seiner Zeit die Unterscheidung und Gegenüberstellung von Monarchien und Republiken eingeführt, wobei letztere vor allem in Gestalt der italienischen Stadtstaaten präsent waren.

Statt von Staatsformen könnte man ebenso gut von Modellen sprechen. Ihr bestimmendes Unterscheidungsmerkmal ist die Eigenart des Machthabers, d.h. des Subjekts, das die Herrschaftsmacht innehat oder, modern gesprochen, Träger der Staatsgewalt ist.

Im 20. Jahrhundert ist in den Gestalten des Sowjetstaates und des NS-Staates eine neue Staatsform entstanden, der „totale Staat“ oder das „totalitäre Herrschaftssystem“. Die Forschung hat mehrere **Totalitarismus-Modelle** zu ihrer theoretischen Erfassung entwickelt. Nach meinem Dafürhalten stammt das klarste und

²¹ Zur richterlichen Rechtsfortbildung siehe Horn, Norbert: Einführung in die Rechtswissenschaft und Rechtsphilosophie, Heidelberg 1996, S. 111 ff.

²² Imboden, Max: Die Staatsformen, Basel und Stuttgart 1959, S. 14 ff.; Zippelius, Reinhold: Allgemeine Staatslehre. Politikwissenschaft, 13. Auflage, München 1999, S. 158 ff.

daher auch überzeugendste Modell von dem Politikwissenschaftler *Peter Graf Kielmansegg*²³. Sein Ausgangspunkt ist die Erkenntnis, dass alle politischen Systeme als Institutionalisierungen der Fähigkeit verstanden werden können, für eine Gesamtheit von Menschen, die auf einem Territorium zusammenleben, verbindliche Entscheidungen zu treffen und diese durchzusetzen. Die Unterschiede zwischen politischen Systemen ließen sich aus den Antworten auf die folgenden drei Leitfragen gewinnen:

1. wie sind die Chancen bei der Einflussnahme auf die Entscheidungen verteilt?
2. welche potentielle sachliche Reichweite haben die Entscheidungen?
3. über welches Sanktionsinstrumentarium verfügt der Entscheidungsträger, um die Geltung und Befolgung seiner Entscheidungen sicherzustellen?

Typisch für die totalitäre Herrschaft sei, so *Graf Kielmansegg*, die folgende Merkmalskombination:

1. die monopolistische Konzentration der Chancen der Einflussnahme auf die Entscheidungen in einem Führungszentrum;
2. die in sachlicher Hinsicht prinzipiell unbegrenzte Reichweite der Entscheidungen;
3. die prinzipiell unbegrenzte Breite und Intensität des dem Entscheidungszentrum zur Verfügung stehenden Sanktionspotentials.

Der zu einem totalitären Herrschaftssystem führende und für dieses System typische Primärimpuls, also die Quelle seiner inneren Dynamik, ist nach *Graf Kielmansegg* der Wille, eine Entscheidungsgewalt von unbegrenzter Reichweite in Anspruch zu nehmen. Darin lägen der Wunsch und der Versuch, das gesamte soziale Geschehen einer zentralen und zugleich monopolistischen Steuerung zu unterwerfen und alle Bürger des Gemeinwesens für einen verbindlich vorgegebenen, ideologischen Zweck (Zwecken) zu mobilisieren. Die soziale Massenmobilisierung und Kontrolle geschehe mit Hilfe einer Ideologie und einer besonderen Herrschaftsorganisation, der Einheitspartei.

Dass der Versuch einer totalen Steuerung der Bürger in der Wirklichkeit nicht voll realisiert werden könne, lehre zwar die Erfahrung, sei aber kein durchschlagender Einwand gegen dieses Modell, denn der **Versuch** einer totalen sozialen Mobilisierung der Bürger, ihrer totalen politischen Steuerung und Kontrolle von

²³ Krise der Totalitarismustheorie? in: Zeitschrift für Politik 1974, S. 311–328; zu älteren, beschreibend und typologisierend ansetzenden Modellen des totalen Staates siehe die Aufsatzsammlung von Seidel, Bruno/Jenkner, Siegfried (Hrsg.): Wege der Totalitarismus – Forschung, Darmstadt 1968 (Wege der Forschung, Band CXL).

Seiten des Entscheidungszentrums führe in der Realität unter den Bedingungen des modernen Staates jedenfalls näherungsweise zu einer Herrschafts-, Staats- und Gesellschaftsordnung, die sich von allen aus der Geschichte bislang bekannten Staatsformen wesentlich unterscheide.

Für den Rechts- und Staatswissenschaftler, der sich rechtsvergleichend mit den Staatsformen beschäftigt und dabei primär Rechtsnormen analysiert, ist das von *Kielmansegg* entwickelte Totalitarismus-Modell nützlich, denn die für den totalen Staates typische Eigenart besteht darin, die Bürger auf ein ideologisch definiertes, utopisches Ziel hin zu steuern, etwa das Ideal eines neuen Menschen, einer prinzipiell neuen Gesellschaft oder eines neuen, fundamental anders organisierten Staatswesens. Die im Ansatz intentionale Ausrichtung der totalitären Herrschaft verleiht dieser zwangsläufig einen starken normativen Grundzug. Das aber macht das Totalitarismus-Modell für den Juristen als Normwissenschaftler besonders interessant, denn der totalitäre Charakter des Systems schlägt sich zwangsläufig am reinsten in seinen Rechtsvorschriften als dem wichtigsten Normensystem nieder.

c. Regierungs- und Wahlrechtssysteme

Ein anderes Beispiel für Modellbildung ist die Lehre von den *Regierungssystemen*²⁴. Nach dem Kriterium, gegenüber welchem Verfassungsorgan die Regierung bzw. der Regierungschef verantwortlich ist, gegenüber dem Staatsoberhaupt (Präsident) oder gegenüber der Volksvertretung (Parlament), werden sowohl in der Politikwissenschaft als auch in der Staatsrechtswissenschaft und in der Vergleichenden Regierungslehre Präsidialsystem, Parlamentarisches Regierungssystem und Mischsysteme unterschieden. Mischsysteme können semipräsidentielle Systeme oder präsidentiell-parlamentarische bzw. parlamentarisch-präsidentielle Systeme sein. Man könnte auch von Regierungsmodellen sprechen, denn es handelt sich um politische und rechtliche Organisationsstrukturen, die stark vereinfacht sind. Sie stellen auf ein einziges, für entscheidend gehaltenes, systembestimmendes Merkmal ab, nämlich auf die Abhängigkeit des Ministerkabinetts mit dem Premierminister an der Spitze entweder vom Vertrauen des Präsidenten als Staatsoberhaupt oder vom Parlament oder von beiden Organen, und zwar sowohl bei der Einsetzung in das Amt als auch hinsichtlich der Dauer der Amtstätigkeit, die entweder der Präsident durch Entlassung oder das Parlament im Wege eine Misstrauensvotums beendet könnte.

²⁴ Brunner, Georg: Präsident, Regierung und Parlament: Machtverteilung zwischen Exekutive und Legislative, in Luchterhandt, Otto (Hrsg.): Neue Regierungssysteme in Osteuropa und der GUS, 2. Auflage, Berlin 2002, S. 66–122.

Ein weiteres Beispiel sind Modelle im **Wahlrecht**. Man spricht auch von Wahlsystemen²⁵: Mehrheitswahlrecht, für welche Wettbewerb und Wahl zwischen Persönlichkeiten typisch sind, Verhältniswahlrecht, bei dem die Parlamentsmandate aufgrund von Kandidatenlisten verteilt werden oder diverse Mischungen zwischen beiden Systemen, indem teils die eine, teils die andere Komponente ein stärkeres Gewicht besitzt, wie z.B. im Wahlrecht zum Deutschen Bundestag das Verhältniswahlrecht, modifiziert um die Einfügung eines personalen Elements in Gestalt der Erststimme nach Maßgabe des Mehrheitswahlprinzips.

d. Modelle des Verhältnisses zwischen Staat und Kirche

In Modellen hat die Wissenschaft seit dem 19. Jahrhundert auch die Beziehungen zwischen dem Staat einerseits und den Kirchen bzw. Religionsgemeinschaften andererseits erfasst. Nach dem Kriterium, welcher Verband – Staat oder Kirche – dem anderen übergeordnet ist, haben sich im Laufe der Geschichte verschiedene „Systeme“ herausgebildet²⁶: 1. das Kirchenstaatstum, charakterisiert durch die völlige Verschmelzung der staatlichen Hoheitsgewalt mit der kirchlichen Amtsgewalt und Ämterhierarchie, historisch realisiert im Kirchenstaat des Papstes, wieder erstanden durch die Lateran-Verträge (1929) in Gestalt des Vatikanstaates; 2. das Staatskirchentum, für das die völlige Unterordnung der Kirche unter die Staatsgewalt und darüber hinaus die institutionelle Einfügung der Kirche in die staatliche Organisation typisch sind; 3. das Modell der institutionell-organisatorischen Trennung von Staat einerseits und Kirche bzw. Religionsgemeinschaften andererseits. Zwischen diesen reinen Modellen, man könnte sie auch Grundformen nennen, gibt es Mischformen. So hat sich in den deutschen Ländern nach 1848 das in der absolutistischen Monarchie herrschende Staatskirchentum unter dem Einfluss von Säkularisierung und Liberalismus abgeschwächt zu dem sogenannten „System der staatlichen Kirchenhoheit“. Das ist eine modellhaft vereinfachte Ordnung, in welcher – im Sinne des Trennungsgedankens – die prinzipielle Verschiedenheit von Staat und Kirche anerkannt ist und der Staat, hiervon ausgehend, seine Macht gegenüber den christlichen Kirchen auf einzelne Hoheitsrechte beschränkt hat, etwa die Genehmigung von Kirchenordnungen, die Zustimmung zu Bischofsernennungen in Gestalt des sog. Placets usw.)²⁷.

²⁵ Harfst, Philipp: Wahlsysteme: Institutionelle Entwicklung und politische Auswirkungen, in: Grotz, Florian/ Müller-Rommel, Ferdinand (Hrsg.): Regierungssysteme in Mittel- und Osteuropa. Die neuen EU-Staaten im Vergleich, Wiesbaden 2011, S. 107–126.

²⁶ Kahl, Wilhelm: Lehrsystem des Kirchenrechts und der Kirchenpolitik. Erste Hälfte. Einleitung und Allgemeiner Teil, Freiburg i.B. und Leipzig 1894, S. 246 ff.;

²⁷ Freiherr von Campenhausen, Axel: Staatskirchenrecht, 3. Auflage, München 1996, S. 385 ff.

Nach 1918, verkündet in der Weimarer Reichsverfassung (Art. 137), treten Staat und Kirchen noch weiter auseinander. Man spricht von einer „hinkenden Trennung“ beider Verbände²⁸, hinkend deswegen, weil die Kirchen weiterhin Körperschaften des Öffentlichen Rechts waren und noch diverse institutionelle Verbindungen zwischen dem Staat und den beiden christlichen Großkirchen bestanden, etwa im Schulwesen, im Finanz- und Steuerwesen, in der Militärseelsorge, bei der Zuständigkeit der Verwaltungsgerichte in Kirchensachen.

Unter dem Grundgesetz hat sich die Tendenz zur Trennung von Staat und Kirche weiter verstärkt. Die Legitimation und Rechtsgrundlage der Kirchen beruht, wie bei allen Religionsgemeinschaften, nunmehr auf dem Grund- und Menschenrecht der Religionsfreiheit²⁹. Zwar behielten die Kirchen ihren Körperschaftsstatus, aber er ist nicht mehr Ausdruck obrigkeitlicher Kirchenhoheit des Staates, sondern umgedeutet worden zu einer Form der kulturstaatlichen Förderung aller Religionsgemeinschaften, sofern sie die gesetzlichen Voraussetzungen für den Erwerb des öffentlich-rechtlichen Körperschaftsstatus erfüllen. Man betont nun nicht mehr, negativ, die „Trennung“ von Kirche und Staat, sondern spricht von einem Koordinationsmodell, für das die Kooperation von Staat und Religionsgemeinschaften auf Feldern gemeinsamen Interesses kennzeichnend ist. Das betrifft vor allem die Caritas, die Sozialfürsorge, die Kultur, das Bildungswesen, das Gesundheitswesen und die Anstaltsseelsorge.

Ich habe einmal vor Jahrzehnten auf der Grundlage eines Vergleichs zwischen dem Sowjetstaat und dem NS-Staat untersucht, ob dem totalen Staat ein nur für ihn charakteristisches Modell des Verhältnisses von Staat und Kirche bzw. Religionsgemeinschaften eigen ist. Unter Nutzung des Totalitarismus-Modells *Graf Kielmansegg* habe ich die Hypothese bestätigt gefunden³⁰. Ausgehend von der Religionsfeindlichkeit der mit dem Anspruch der unbedingten Ausschließlichkeit auftretenden und dementsprechend militanten säkularen Weltanschauung (Ideologie) der Einheitspartei und ihrer Führung, haben wir es mit einem „**Modell der feindlichen staatlichen Religionshoheit**“ zu tun³¹. Charakteristisch für die Lage der Religionsgemeinschaften im totalen Staat ist ihre gesellschaftliche Marginalisierung etwas oberhalb eines Verbots sowie die völlige politisch-administrative Beherrschung und Kontrolle ihrer Organisationen durch Parteiapparat und Staat-

²⁸ Freiherr von Campenhausen, Staatskirchenrecht, a.a.O. S. 40.

²⁹ Mückl, Stefan: § 159. Grundlagen des Staatskirchenrechts, in: Isensee, Josef/Kirchhof, Paul (Hrsg.): Handbuch des Staatsrechts der Bundesrepublik Deutschland., 3. Auflage, Band VII. Freiheitsrechte, Heidelberg 2009, S. 711–789.

³⁰ Luchterhandt, Otto: Die Rechtsstellung der Religionsgemeinschaften im totalen Staat. Ein Vergleich zwischen Sowjet- und NS-Staat, in: Zeitschrift für evangelisches Kirchenrecht 24. Bd. (1979), S. 111–170.

³¹ So Luchterhandt, a.a.O., S. 166 ff.

sicherheitsdienst. Letztlich geschieht das zu dem verkündeten ideologischen Ziel, die Religionsgemeinschaften zu vernichten, weil sie im geschlossenen System des totalen Staates einen nicht integrierbaren Fremdkörper darstellen.

D. Schluss: Funktionen von Typen und Modellen

Typisierung und der Modellbildung haben ein gemeinsames Ziel: es geht um Reduktion auf das Wesentliche im Wege der Vereinfachung, auch um Veranschaulichung, um die Herausarbeitung und Herausstellung von wesentlichen, charakteristischen Merkmalen von Erscheinungen einer Wirklichkeit, die der Beobachter – nicht ohne ein bei ihm auf welche Weise auch immer bereits vorhandenes Vorverständnis – im Blick hat.

Modellbildung erfüllt in der Rechtswissenschaft *zwei Hauptfunktionen*: erstens eine *kognitive* und zweitens eine *normative* Funktion.

1. Modelle können die Funktion haben, ein vereinfachtes Abbild eines bestimmten Phänomens zu sein, das in der Wirklichkeit zwar vorkommt, sich in ihr aber nur in der Vermittlung zahlloser individueller Besonderheiten zeigt und hinter diesen Besonderheiten unter Umständen verborgen ist. Das Modell erleichtert das Verständnis des Phänomens und damit zugleich die Verständigung darüber, vor allem in den Wissenschaften, aber auch in der Publizistik und im Alltag einer Gesellschaft. Man kann von einem kognitiven Modell sprechen, denn seine Funktion liegt primär in einer besseren, genaueren Erkenntnis und damit auch Verständnis der Wirklichkeit. Das Verfahren, in welchem das Abbild bzw. Modell gewonnen wird, ist die empirisch vorgehende Analyse im Wege einer induktiven, analytisch-abstrahierenden Methode. Sie legt die in der prallen Wirklichkeit versteckte Struktur des Phänomens frei. Solche Modelle werden erkannt und gefunden, nicht erfunden.

Damit kann sich eine heuristische Funktion verbinden, indem nämlich das Modell mit den in der Wirklichkeit begegnenden Phänomenen abgeglichen und festgestellt wird, wie groß die Entfernung der empirischen Wirklichkeit vom Modell ist.

2. Modelle können aber auch die Funktion haben, eine Vorlage, ein Vor-Bild für etwas erst noch zu Schaffendes, in die soziale Wirklichkeit Einzuführendes und in ihr Anzuwendendes oder zu Nutzendes zu sein. In der Automobilindustrie etwa wäre das der Prototyp oder die ihn darstellende Zeichnung für ein neues, in Serie gehendes Modell. In der Rechtswissenschaft gibt es dergleichen auch, nehmen Sie etwa als Beispiel das Modell einer radikalen Steuervereinfachung, das mein Heidelberger Staatsrechtskollege, der Finanz- und Steuerrechtler *Paul Kirchhof* entwickelt hat³². Dabei geht es um die Schaffung normativer Vorgaben für die

³² „Das Kirchhof-Modell“: <http://www.bild.de/politik/inland/steuersenkungen/paul-kirchhof-modell-weniger-steuerlast-fuer-alle-18571644.bild.html>.

Gestaltung von Wirklichkeit, nämlich des gesamten Steuerwesens in Deutschland, um dessen Rekonstruktion und Umsteuerung. *Kirchhof* ist allerdings über eine bloße Modell-Darstellung hinausgegangen, indem er auf der Grundlage seines Modells den Entwurf eines kompakten, alle Steuergesetze ersetzenden „Steuer-gesetzbuches“ vorgelegt hat.

Man kann Modelle dieser Art und Funktion als normativ-präskriptive Modelle bezeichnen. Die zu seiner Entwicklung angewandte Methode ist primär die konstruktiv-synthetische.

3. Der Drang und das Bedürfnis nach Modellbildung und die in der Rechtswissenschaft zur Anwendung kommenden Arten von Modellen sind unterschiedlich. Sofern es der Rechtswissenschaft um die vertiefte theoretische Durchdringung und Erkenntnis der Rechtsordnung insgesamt oder einzelner ihrer Teile und Gebiete geht, dominieren kognitive und heuristische Modelle, sofern die Absicht besteht, auf der Grundlage rechtswissenschaftlich gewonnener und abgesicherter Erkenntnisse neue rechtliche Regelungen oder ganze Regelungskomplexe einzuführen, werden konstruktive oder präskriptiv-normative Modelle entwickelt.

Multiphysik-Ansätze in der Biologie

OTTO RICHTER, MONA RICHTER, NGUYEN HOANG ANH,
MERIMEE YANKE UND JANIN RUMMLAND

Institut für Geoökologie der TU Braunschweig
Langer Kamp 19 c, D-38106 Braunschweig

Zusammenfassung

Unter Multiphysik versteht man ursprünglich die gleichzeitige und gekoppelte Anwendung unterschiedlicher physikalischer Prozessmodelle. Multiphysik-Ansätze werden typischerweise durch Systeme von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen modelliert, die durch Finite Element Methoden gelöst werden. Solche Ansätze sind nicht auf die Physik beschränkt. Eine verallgemeinerte Definition umfasst die Kombination von Prozessmodellen aus unterschiedlichen Disziplinen und unterschiedlicher mathematischer Strukturen in einer Anwendung. Dieser erweiterte Ansatz ist insbesondere für die Modellbildung in der Biologie geeignet, da hier grundsätzlich unterschiedlichen Disziplinen zugeordnete Prozesse verschränkt ablaufen. Das wird an vier Beispielen demonstriert: Modelle für den Bioreaktor Boden, in dem sich mikrobielle und physikalische Prozesse gegenseitig beeinflussen, für den Stofftransport im System Boden-Pflanze, für die Populationsdynamik von Schädlingen und ihre Interaktion mit Kulturpflanzen und für die Resistenzausbreitung von Unkräutern, in der populationsdynamische, genetische und physikalische Submodelle unterschiedlicher mathematischer Strukturen zusammen wirken.

1. Einführung

Unter "Multiphysik" versteht man traditionell die simultane und gekoppelte Anwendung unterschiedlicher physikalischer Prozessmodelle. Multiphysik-Ansätze sind motiviert durch die mathematische Modellierung komplexer Systeme, bei denen Prozesse unterschiedlicher "Physiken" miteinander verzahnt ablaufen und sich nicht separat behandeln lassen. Eine typische Anwendung ersieht man aus dem folgenden Vortragsthema einer Multiphysics Conference: Acoustic-Structure Interaction Modeling of Piezoelectric Transducer in Fluid Medium (Acosta et

* Der Vortrag wurde am 11.10.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

al. 2012). Der Vortrag behandelt das Zusammenwirken einer Vielzahl physikalischer Teildisziplinen: Akustik, Mechanik, Elektrodynamik, Festkörperphysik und Fluidodynamik. Als weiteres Beispiel wird der Stofftransport einer reaktiven Substanz in einem porösen Medium, wie es der Boden darstellt betrachtet. Hier laufen folgende Prozesse simultan ab: Wassertransport, Stofftransport, Sorption und Desorption an die Bodenmatrix, chemische Umwandlung und Wärmetransport. Zur Beschreibung dieses Systems benötigt man das Geschwindigkeitsfeld des Wassers gekoppelt mit einer Transportgleichung, eine temperaturabhängige chemische Reaktionskinetik, eine Wärmetransportgleichung und eine Kinetik für die Sorption und Desorption. Der Modellansatz besteht typischerweise aus einem System gekoppelter partieller Differentialgleichungen mit Reaktionstermen. Der Begriff Multiphysik hat jedoch in den letzten Jahren eine Erweiterung erfahren und beschränkt sich nicht mehr auf rein physikalische Prozesse. In einem erweiterten Sinne versteht man unter Multiphysik die Kombination von Prozessmodellen aus unterschiedlichen Disziplinen und/ oder die Kombination von Prozessmodellen unterschiedlicher mathematischer Strukturen in einer Anwendung. Multiphysik-Ansätze haben breite Anwendungsfelder in Bereichen wie Mechatronik, Maschinenbau, erneuerbare Energien, Geophysik und Geochemie, Umwelttechnik, Biologie und Medizintechnik eröffnet. Ein besonders reizvolles Anwendungsgebiet ist die Biologie, da hier die Mathematisierung erst seit einigen Jahrzehnten intensiv eingesetzt und diverse mathematische Strukturen und Ansätze hervorgebracht hat, teils in Anlehnung an die Modellbildung in der Physik aber auch eigenständig von der Biologie selbst begründet. Im Folgenden werden vier Anwendungen von Multiphysik-Ansätzen in der Biologie behandelt, die unterschiedliche Ansätze und ihre Kopplung zeigen. In der ersten Anwendung wird der Boden als ein Bioreaktor modelliert, in dem physikalische reaktive Transportprozesse mit der Dynamik von Biofilmen gekoppelt sind. Dabei beeinflussen die Biofilme durch die Änderung der Porengeometrie das Transportverhalten, andererseits wird ihre Dynamik vom Nährstofftransport bestimmt. Der Modellansatz ist aus einem Guss: sämtliche Prozesse werden durch partielle Differentialgleichungen beschrieben. Dies ist auch der Fall in der zweiten Anwendung: Hier wird der Wasser- und Stofftransport in einem Baum durch einen physikalischen Kontinuumsansatz beruhend auf dem hydraulischen Potential beschrieben, wobei die Regulation der Transpiration durch das Blätterdach von einem biologischen Teilmodell beschrieben wird. In der dritten Anwendung wird ein hybrider Ansatz vorgestellt, in dem ein zeitdiskretes populationsdynamisches Modell für einen Schädling mit mehreren Entwicklungsstadien mit einem zeitkontinuierlichen Modell für das Wachstum einer Baumwollkultur gekoppelt wird. Im letzten Beispiel wird die Entwicklung herbizidresistenter Biotypen von Unkräutern und ihre räumliche Ausbreitung behandelt, wobei sowohl physikalische Prozesse (Ausbreitung von Pollen und Samen) und genetische Prozesse durch stochastische und deterministische Modelle gekoppelt werden. Dieser Artikel soll eine Vorstellung über die Vielfältigkeit von Multiphysik-Ansätzen in der Biologie vermitteln. Dabei kann auf

die Modellgleichungen nicht im Detail eingegangen werden. Die grundlegenden Ansätze werden jedoch in Kästen dargestellt um so dem Leser einen Einblick in die mathematischen Strukturen zu geben.

2. Der Boden als Bioreaktor

Das folgende Modell wurde entwickelt um den mikrobiellen Abbau von organischen Substanzen im Boden auf der Porenskala zu beschreiben. Mikroorganismen kommen im Boden in Suspension mit dem Bodenwasser oder als Biofilme innerhalb und außerhalb von Bodenaggregaten vor (Ranjard und Richaume, 2001). Biofilme sind Bakterienpopulationen, die von einer Matrix aus Extrazellulären Polymeren Substanzen (EPS) umschlossen sind (Costerton, 1995).

Durch ihr Wachstum verändern Biofilme den Porenraum des Bodens und können so ganze Poren verstopfen (Kim et al., 2010). Sie stellen so Fließwiderstände für das Bodenwasser dar, was im Modell durch eine Veränderung der Viskosität proportional zur Biofilmdichte ausgedrückt wird. Andererseits können Teile von Biofilmen durch hohe Wasserfließgeschwindigkeiten abgerissen werden (Park et al., 2011). Die organischen Substanzen werden sowohl mit Hilfe des Fließgeschwindigkeitsfeldes des Bodenwassers als auch durch molekulare Diffusion transportiert, wobei sich die Diffusionskonstante je nach Medium, Biofilm oder Wasser, ändert (Wey et al., 2012, Wood und Whitaker, 2000). Bodenpartikel können die organischen Substanzen adsorbieren. Der Abbau der Substanz durch die Mikroorganismen wird im Model durch eine Monod-Kinetik beschrieben.

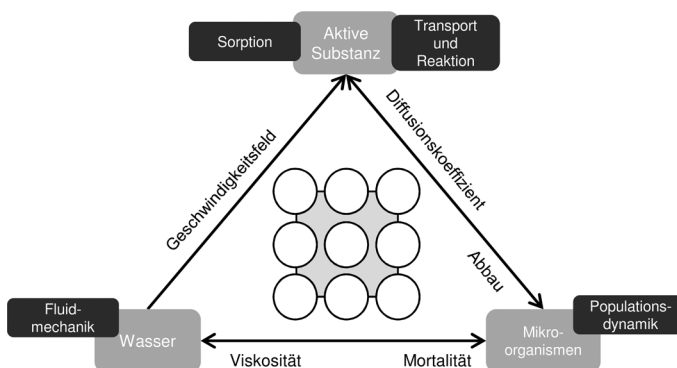
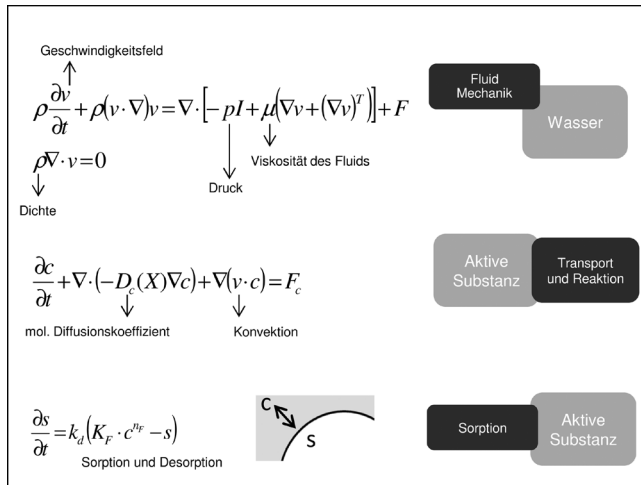


Abb. 2.1. Modelldreieck bestehend aus seinen Komponenten (graue Kästen) und den dazugehörigen Prozessen (schwarze Kästen) und Abhängigkeiten (Pfeile). Modellgeometrie bestehend aus Bodenkörnern (weiße Kreise) und dem Porenraum (grauer Zwischenraum).

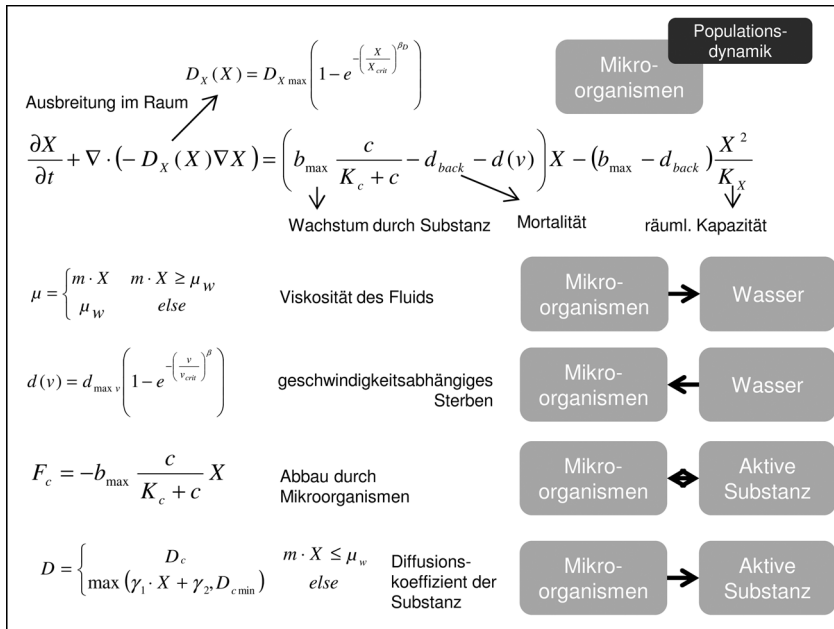


Kasten 2.1. Modellgleichungen für die drei Modellkomponenten Wasser und Substanz. Die Navier-Stokes Gleichungen für den Wassertransport werden mit der Konvektions-Diffusionsgleichung für den Stofftransport gekoppelt. Die Sorptionsgleichung, die nur auf den Partikelrändern gelöst wird, beschreibt die Sorptionsisotherme nach Freundlich.

Der abgebaute Stoff dient dem Biofilm als Wachstumssubstrat. In der Abb. 2.1 ist das Modelldreieck mit seinen Komponenten, Prozessen und Abhängigkeiten dargestellt. In der Mitte des Dreiecks ist ein Ausschnitt der homogenen Modellgeometrie zu sehen. Die dazugehörigen Gleichungen sind in den Kästen 2.1 und 2.2 zu finden. Alle Gleichungen werden im Porenraum gelöst, bis auf die Sorptionsgleichung. Sie wird auf den Partikelrändern gelöst.

Das Modell wurde für eine Geometrie, die einem homogenen Sand mit einer Korngröße von 0.5 mm und einer Porosität von 0.47 entspricht, in COMSOL Multiphysics 4.3 gelöst. Die Simulationszeit betrug 120 Tage. Die Anfangsverteilungen des Biofilms (Abb. 2.2, links) und der organischen Substanz waren ebenfalls homogen. Das System wurde als Durchflussreaktor implementiert, d.h. der Fluss aus dem System ist gleich dem Fluss in das System. Der Biofilm kann in den Zonen geringer Geschwindigkeiten an Dichte zunehmen, aber wird in den Fließwegen des Wassers abgerissen (Abb. 2.2, rechts).

Die Abbildung 2.3 stellt den zeitlichen Verlauf der mittleren Geschwindigkeit, der Substanzkonzentration und der Biofilmdichte im System dar. Am Verlauf der mittleren Geschwindigkeit lassen sich die Interaktionen vom Biofilm und vom Wasser ablesen. Die ersten 40 Tage sind durch steigende mittlere Geschwindigkeiten und damit durch einen sterbenden Biofilm gekennzeichnet. Die mittlere Biofilmdichte allerdings spiegelt dieses Bild nur in den ersten 20 Tagen wieder,



Kasten 2.2. Modellgleichungen für die Mikroorganismen und die Wechselwirkungen mit dem Wasser und der Substanz. Die Populationsdynamik beruht auf einer Reaktions-Diffusionsgleichung mit logistischem Wachstum.

was am deutlichen Wachstum in den Zonen geringer Geschwindigkeiten liegt (Abb. 2.2, rechts).

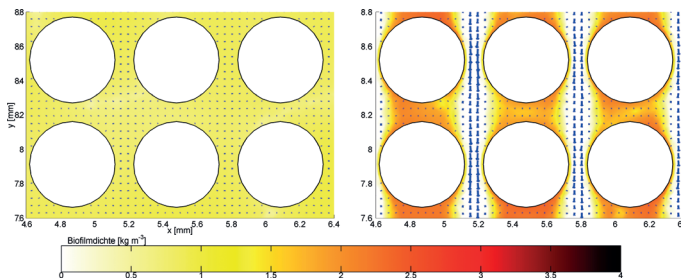


Abb. 2.2. Anfangsverteilung der Biofilmverteilung (links) und die Verteilung nach 30 Tagen (rechts). Die blauen Pfeile stellen das Geschwindigkeitsfeld dar.

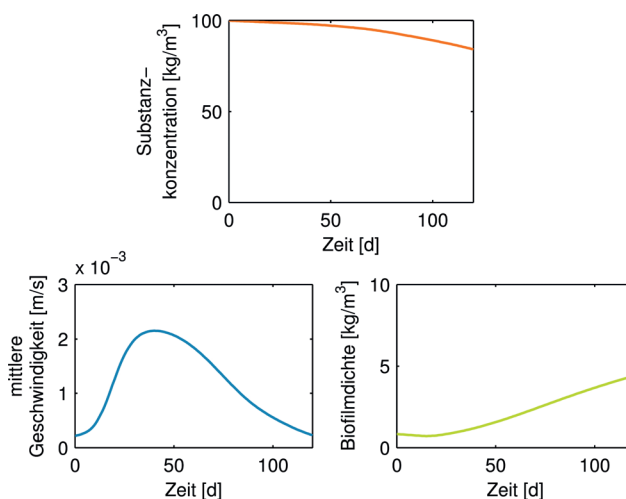
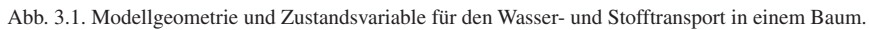


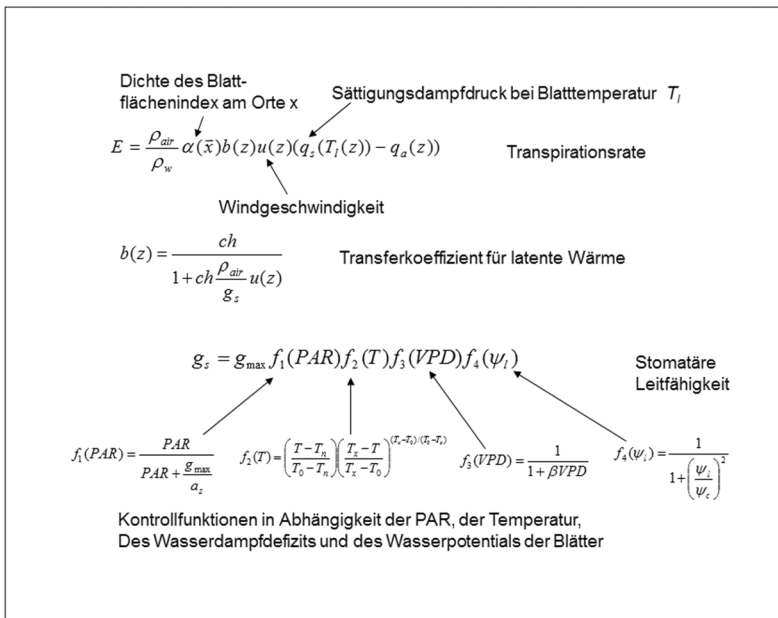
Abb. 2.3. Zeitlicher Verlauf der drei Modellkomponenten Biofilm, Substanz und Wasser im gesamten Gebiet.

3. Stofftransport im System Boden-Pflanze

Das folgende Modell wurde entwickelt, um das Remediationspotential von Mangroven in stark belasteten Ästuaren (Pahalawattarachi et al. 2009) abzuschätzen. Die hier vorgestellte Version ist ein Prototyp und benötigt noch spezifische Parameter für ausgesuchte Schadstoffe. Der mathematische Ansatz für den Stofftransport im System Boden-Pflanze beruht auf der Kohäsions-Wasserspannungstheorie (Cohesion-Tension Theory). Die Potentialdifferenz zwischen Wurzel und Atmosphäre erzeugt eine Saugspannung, die durch die Kohäsion der Wassermoleküle im Xylem den Transpirationsstrom treibt. Physikalische und biologische Prozesse sind hier eng verknüpft: Der Transport ist ein physikalischer Prozess, der im Rahmen der Wassertransporttheorie in porösen Medien beschrieben werden kann, während die Transpiration durch die Blätter ein komplizierter biologischer Prozess ist, der durch Umweltvariablen und das Wasserpotential in der Pflanze gesteuert wird (Janott et al. 2011, Richter et al. 2013). Abbildung 3.1 zeigt das konzeptuelle Modell mit den Bezeichnungen der Zustandsvariablen. Das System wird in Kompartimente aufgeteilt, die durch den Austausch von Wasser und in Wasser gelösten Substanzen in Verbindung stehen. Kasten 3.1 zeigt die Modellgleichungen für den Wasser- und Stofftransport, Kasten 3.2 zeigt das Teilmodell für die Regulation der Transpiration. Die Transpirationsrate wird im Wesentlichen durch die stomatäre Leitfähigkeit geregelt, die von den Umweltvariablen Strahlung, Temperatur, Wasserdampfdefizit und vom Wasserstatus des Gewebes abhängt. Die komplizierten Detailprozesse wie z.B. den hydroaktiven Spaltenschluss, der durch



Kasten 3.1. Modellgleichungen für den Wasser- und Stofftransport. Sie beruhen auf der Kopplung der Richardsgleichung für den Wassertransport in porösen Medien mit der Konvektions-Dispersionsgleichung.



Kasten 3.2. Teilmodell für die Regelung der Transpiration durch die Umweltvariablen Temperatur, Wasserdampfdefizit, Strahlung, Wasserpotential der Atmosphäre, Wind und das Wasserpotential der Blätter.

das Zusammenwirken vom Abscisinsäure Stoffwechsel und osmotischer Arbeit bewirkt wird, werden dabei durch empirische Responsfunktionen beschrieben.

Das Modell ist vollständig durch gekoppelte partielle Differentialgleichungen mit entsprechenden Randbedingungen darstellbar. Die Anfangs-Randwertprobleme der folgenden Beispiele wurden mit dem Finite Elemente Werkzeug COMSOL

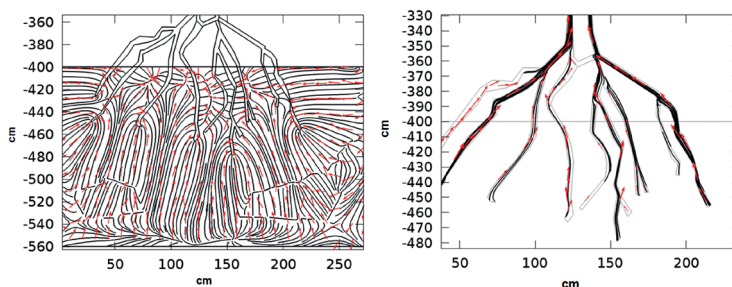


Abb. 3.2. Stromlinienfelder des Wasserflusses im Boden und im Wurzelsystem.

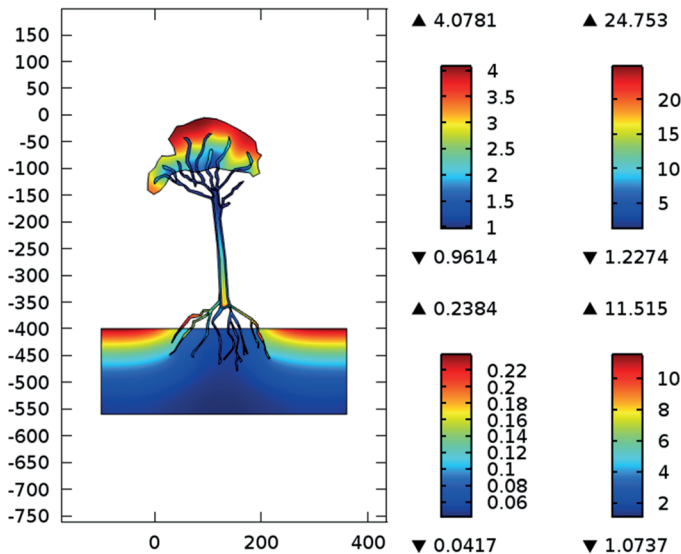


Abb. 3.3. Momentbild der räumlichen Konzentration einer aus dem Boden aufgenommenen Substanz in g/kg. Man beachte, dass die Farbcodierung spezifisch für die Kompartimente ist. Links, oben: Kernholz, rechts oben: Boden, links unten: Blätterdach, rechts unten: Xylem.

Multiphysics gelöst. Die Abbildungen 3.2a und 3.2b zeigen den Verlauf der Stromlinien des Wasserflusses im Boden und in den Wurzeln. Abbildung 3.3 zeigt die räumliche Verteilung einer Substanz im System Boden-Pflanze bei stationärer Zufuhr durch den oberen Rand des Bodens. Abbildung 3.4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Blattpotentials unter konstanten Windverhältnissen und bei starker Variation der Windstärke.

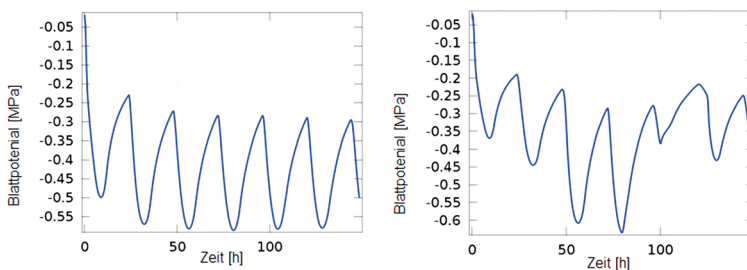


Abb. 3.4. Zeitlicher Verlauf des Blattpotentials an einem festen Punkt bei gleichförmiger Windstärke (links) und bei starker Variation der Windstärke (rechts).

4. Interaktion von Schädlingen und Kulturpflanzen

Das folgende Modell wurde entwickelt, um Managementverfahren bei der Bekämpfung des Baumwollschädling *Helocoverpa armigera* zu optimieren. Abbildung 4.1 zeigt das konzeptuelle Modell.

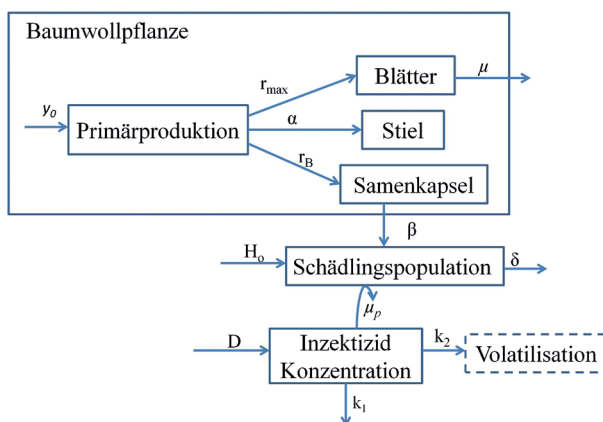


Abb. 4.1. Konzeptuelles Modell für das System Kulturpflanze-Schädling. Das Wachstumsmodell für die Kulturpflanze (Kasten) wird durch ein Differentialgleichungssystem modelliert, ebenso das zeitliche Verhalten des Pestizids. Die Schädlingspopulation wird durch ein zeitdiskretes Modell dargestellt (s. Abb. 4.2).

In dieser Anwendung werden unterschiedliche mathematische Ansätze verwendet: ein zeitkontinuierliches Modell in Form eines Systems von gewöhnlichen Differentialgleichungen für das Wachstum einer Baumwollpflanze und für die Kinetik eines Insektizids und ein zeitdiskretes Modell für die Populationsdynamik einer alters- und stadienstrukturierten Population. Die Dynamik wird durch eine Projektionsmatrix induziert, die aus dem Lebenszyklusgraphen des Schädling (s. Abb. 4.2) abgeleitet wird (Söndgerath et al. 1990, Richter 2005). Die Matricelemente stellen Überlebenswahrscheinlichkeiten in den Altersklassen, Übergangswahrscheinlichkeiten für die Stadien, Schlupfwahrscheinlichkeiten und die Anzahl der Eier pro adultem Tier dar. Um beide Modellansätze zu integrieren, wird das Differentialgleichungssystem für das Wachstum der Kulturpflanze für sukzessive Anfangswertprobleme gelöst, wobei der Zeittakt durch die Zeiteinheit des diskreten populationsdynamischen Modells vorgegeben wird. Am Ende eines Zeitintervalls wird der aktuelle Wert für die Larvendichte in das Differentialgleichungsmodell eingesetzt und das Anfangswertproblem für das nächste Zeitintervall formuliert. Kasten 4.1 zeigt die Modellgleichungen. Die diskrete Dynamik der Schädlinge wird durch sukzessive Formulierung von Anfangswertproblemen für

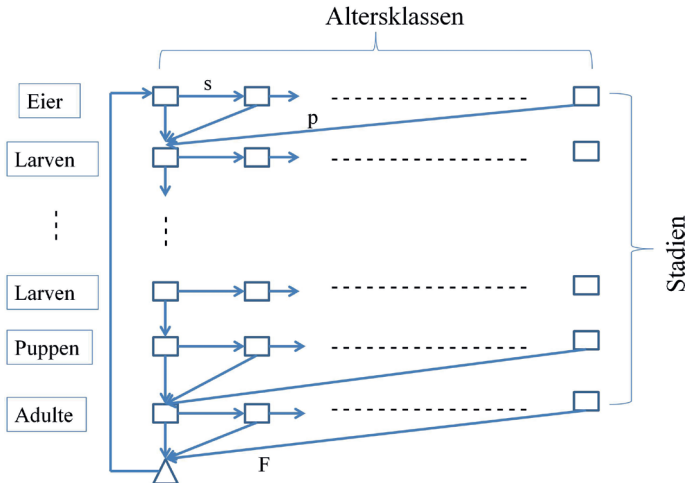
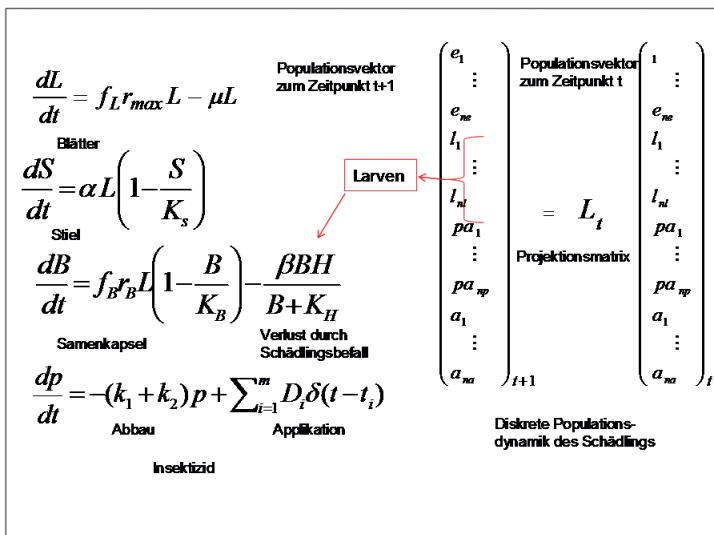


Abb. 4.2. Lebenszyklusgraph einer alters- und stadienstrukturierten Population. Die Knoten des Grafen stellen die Zustände dar und werden durch Überlebenswahrscheinlichkeiten (s), Übergangswahrscheinlichkeiten (p) und Fertilitätskoeffizienten miteinander verknüpft.



Kasten 4.1. Hybride Modellstruktur für die Interaktion Kulturpflanze-Schädling. Das Wachstum der Kulturpflanze mit den Organen Blatt, Stiel und Samenkapitel wird durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben, ebenso die Kinetik eines Insektizids. Die Dynamik des Schädling wird durch einen zeitdiskreten Ansatz beschrieben. Die Projektionsmatrix L , abgeleitet aus dem Lebenszyklus, bildet den Populationsvektor zum Zeitpunkt t auf den Populationsvektor zum Zeitpunkt $t+1$ ab.

das stetige Modell im gewählten Zeittakt, z.B. 1 Tag, in das Modell integriert. Abbildung 4.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Stadien der Schädlingpopulation. Bedingt durch eine Anfangsverteilung mit nur einer Altersklasse, entwickeln sich in dem betrachteten Zeitraum drei nicht überlappende Generationen. Der Verlauf der Biomasse der Kapseln unter dem Einfluss des Fraßes der Larven ist in Abb. 4.4 dargestellt.

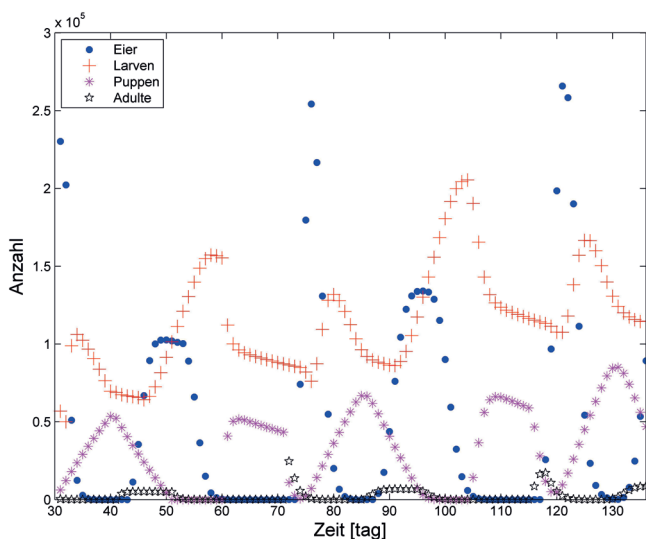


Abb. 4.3. Zeitlicher Verlauf der Stadien der Schädlingpopulation. Da die Dynamik diskret ist, wurden in der Grafik die Punkte nicht verbunden. Die Simulation startet mit einer Alterskohorte (Eier), so dass sich mehrere deutlich getrennte Generationen entwickeln.

5. Resistenzausbreitung

Durch den intensiven Einsatz von Herbiziden in der Landwirtschaft kommt es immer häufiger zur Entwicklung von resistenten Biotypen (Beckie 2006, Powles und Yu 2010, Heap 1997). Die Entwicklung einer monogenetischen Herbizid-resistenz (Target-Site-Resistenz) wird hier mit Hilfe eines individuenbasierten, stochastischen Modells untersucht. In diesem Ansatz wird der Lebensweg von Individuen mittels stochastischer Simulation verfolgt und allgemeine Aussagen werden durch die Statistik über ein genügend großes Ensemble von Einzelschicksalen generiert. Auch diese Methode entstammt der Physik: Sie ist dort unter dem Namen Monte Carlo Simulation bekannt und wurde bereits in den 60iger Jahren im Zusammenhang mit der Simulation von Abbremsprozessen schneller Neutro-

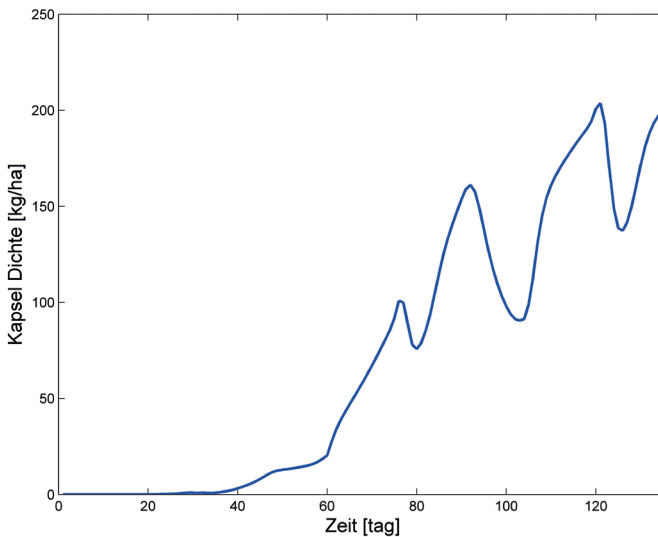


Abb. 4.4. Entwicklung der Biomasse der Kapseln in Wechselwirkung mit der Larvenpopulation. Der Verlust an Biomasse ist korreliert mit der Dynamik der Larven (s. Abb. 4.3).

nen entwickelt. Allerdings sind die Lebensgeschichten von Organismen ungleich komplizierter als die von Elektronen oder Neutronen. Das 1992 von De Angelis und Gross herausgegebene Werk „Individual-Based Models and Approaches in Ecology: Populations, Communities and Ecosystems“ kennzeichnet einen Wendepunkt in der Konzeption von Modellen biologischer Prozesse. Individuenbasierte Modelle werden nicht mehr durch mathematische Gleichungen sondern durch den Programmcode definiert. Es wird kein mathematisches Problem, wie die Lösung eines Anfangswertproblems oder ein Optimierungsproblem, gestellt und gelöst: der Code ist das Modell selbst.

Der hier vorgestellte Modellansatz kombiniert ein

- stochastisches Modell für den Lebenszyklus individueller Pflanzen
- deterministisches Modell für die Ausbreitung von Pollen und Samen
- genetisches Modell.

In einer Pflanzenpopulation können durch natürliche Variabilität Individuen vorkommen, die gegen ein eingesetztes Herbizid resistent sind, d.h. dass das Herbizid keine letale Wirkung mehr hat. Bei der Target-Site Resistenz, auch Wirkortresistenz, kommt es zu einer Veränderung des Rezeptors an dem das Herbizid normalerweise bindet. Die überlebenden Pflanzen geben ihre Erbinformationen an die nächste Generation weiter. Im Falle einer Herbizidresistenz erhöht sich der

Anteil resistenter Individuen in der Population mit jedem weiteren Einsatz des Resistenz verursachenden Herbizides. Um die Resistenzentwicklung in einem Feld zu untersuchen wurden die Lebensstadien eines annuellen Unkrautes in dieses Modell implementiert.

Diese Stadien wurden im Modell wie folgt eingebaut (Abb. 5.1). Das Modell startet mit einer zufälligen Verteilung von Individuen auf einer zuvor bestimmten Fläche. Dafür wird zuerst bestimmt wie viele Pflanzen der drei Biotypen auf der Fläche verteilt werden. Diese drei Biotypen sind homozygot resistent, heterozygot resistent und homozygot sensitiv. Verteilt werden sie indem jeder Pflanze eine zufällige x und y Koordinate zugewiesen wird 5.1 (1)). Diese Pflanzen bilden Pollen und die Ausbreitung der Pollen wird durch einen stochastischen Ausbreitungsprozess modelliert, z.B. durch eine Gaußdichte. Durch Superposition der von den einzelnen Pflanzen erzeugten Pollendichten werden biotypspezifische Pollenkarten erzeugt. Für die Befruchtung wird jetzt jede Pflanze einzeln betrachtet und die über ihr befindliche „Pollenwolke“. Die Pollendichte wird auf 1 normiert. An dem betrachteten Punkt (Pflanzenstandort) wird das Intervall $[0,1]$ gemäß den Anteilen der Pollentypen aufgeteilt. Die Entscheidung mit welchem Pollen die Pflanze befruchtet wird erfolgt dann durch die Position einer in $[0,1]$ gleichverteilten Zufallszahl R (Abbildung 5.1 (2)).

Die befruchteten Pflanzen bilden dann Samen, die genetische Zusammensetzung der Samen ergibt sich aus der Erbinformation der Pflanze und des befruchtenden Pollens. Die Ausbreitung der Samen erfolgt wiederum durch eine Gaußfunktion, hierbei verbleibt der größte Teil der Samen nah an der Pflanze und die Samendichte nimmt mit zunehmender Entfernung schnell ab. Durch Superposition der Samenverteilungen aller Pflanzen erhält man eine Karte der Samendichte (5.1 (3)).

Für die Entscheidung, ob ein Samen keimt, wird die Samenverteilung auf 1 normiert und an einer festgelegten Anzahl an Punkten, die zufällig verteilt sind, wird durch einen zweistufigen Zufallsprozess bestimmt, ob es zur Keimung kommt und wenn ja welchen Biotyp der Keimling besitzt. Der Entscheidungsprozess ist abhängig von den Samendichten der drei Biotypen am betrachteten Punkt. Im ersten Schritt wird eine in $[0,1]$ gleichverteilte Zufallszahl R generiert. Liegt diese unter der normierten Samendichte kommt es zur Keimung. Ähnlich wie bei der Befruchtung wird im 2. Schritt der Biotyp durch einen weiteren Zufallsprozess bestimmt. Dazu wird das Intervall $[0,1]$ gemäß den Anteilen der Biotypen aufgeteilt. Eine weitere Zufallszahl aus $[0,1]$ wird erzeugt und bestimmt gemäß der Aufteilung des Intervalls den Biotyp (Abb. 5.1 (4)). Im nächsten Schritt wird die Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimlinge in Abhängigkeit der Wirkstoffmenge bestimmt, wobei die einzelnen Biotypen unterschiedliche Dosis-Wirkungsfunktionen besitzen (Abb. 5.1 (5)). Die überlebenden Pflanzen produzieren dann wieder Pollen, es kommt zur Befruchtung und Samenbildung und die nächste Generation an Keimlingen entsteht. Abbildung 5.2 zeigt die raumzeitliche Dynamik der Keim-

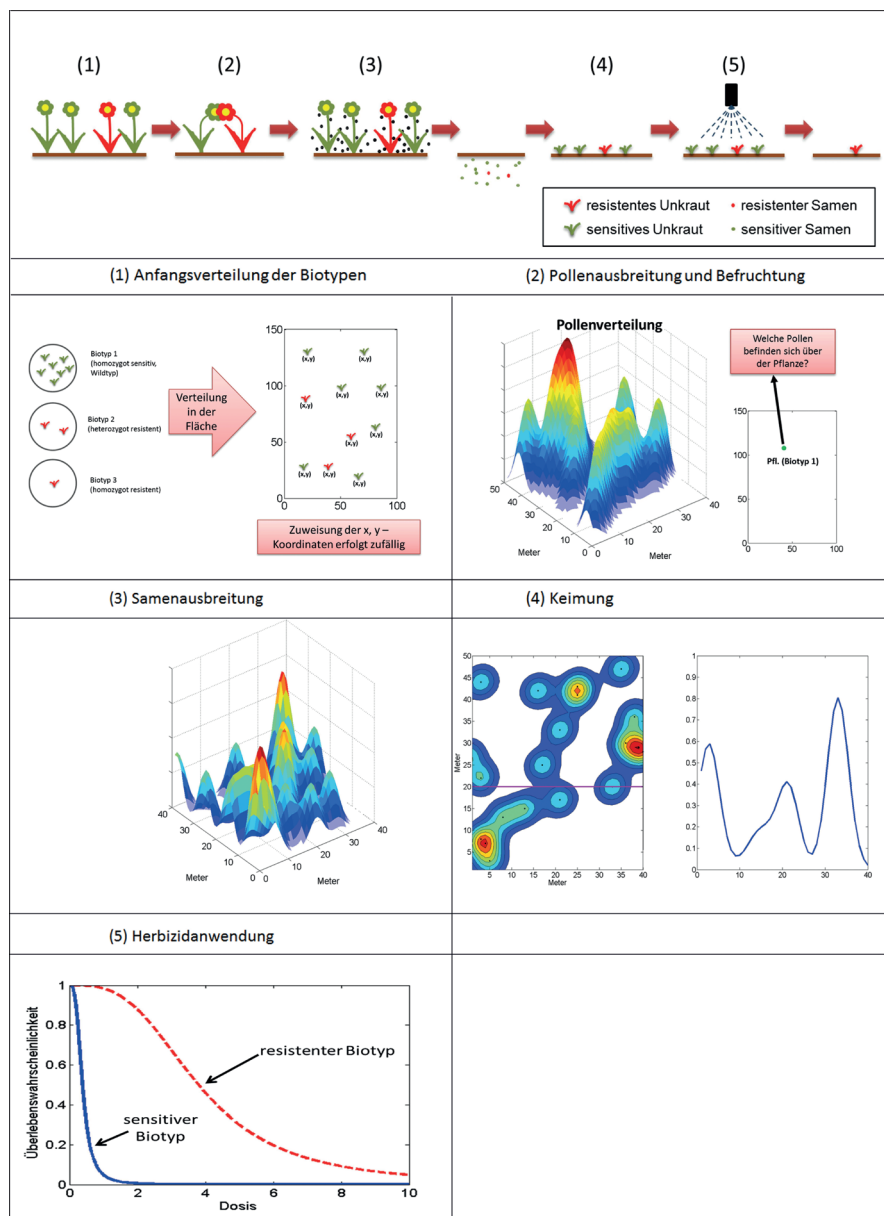


Abb. 5.1. Prozesse des individuenbasierten-stochastischen Modells. 1) Generierung einer Anfangskonfiguration 2) Pollenausbreitung 3) Samenausbreitung 4) Keimung 5) Überleben des Keimlings und Entwicklung zur reifen Pflanze in Abhängigkeit der Wirkstoffmenge eines Herbizids

linge und reifen Pflanzen (die Herbizidapplikation überlebende Pflanzen) über einen Simulationszeitraum von 11 Jahren. Es ist sehr gut zu erkennen wie sich Unkrautnester mit resistenten Pflanzen ausbilden. Diese geklumpten Verteilungen sind typisch für Felder mit Resistenzproblemen.

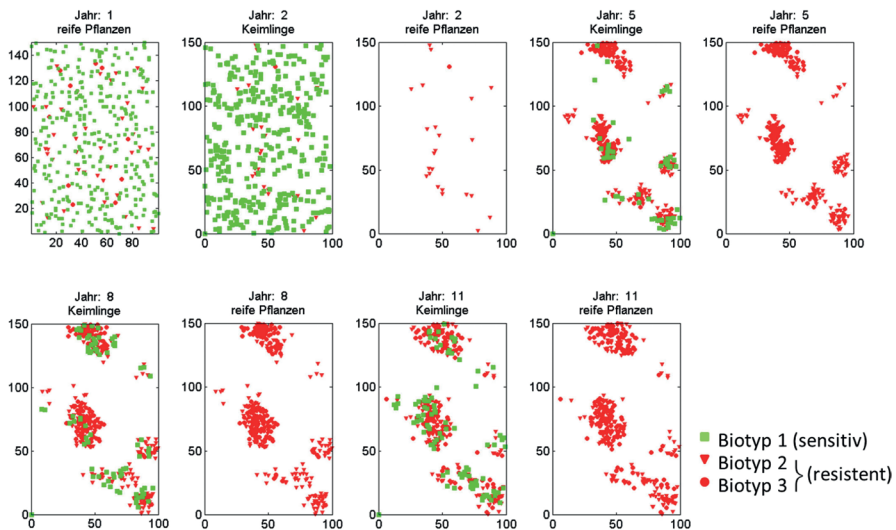


Abb. 5.2. Zeitliche und räumliche Entwicklung einer resistenten Unkrautpopulation auf einem Feld der Dimension 100x150 m. Ausgehend von einer zufälligen Verteilung von Pflanzen mit nur wenigen resistenten Biotypen entwickeln sich unter einer Dauerbehandlung mit einem Herbizid Nester resistenter Pflanzen.

6. Abschließende Bemerkungen

Eine erfolgreiche mathematische Modellbildung in der Biologie erfordert einen intensiven interdisziplinären Dialog zwischen Mathematikern und Biologen, der nicht immer leicht ist. Die Mathematiker müssen in der Lage sein, biologische Prozesse soweit zu verinnerlichen, dass sie diese abstrahieren und mathematisch formulieren können. Sie können nicht erwarten, dass der biologische Partner ihnen ein wohl definiertes mathematisches Problem vorlegt und sie gleich ihr mathematisches Methodenspektrum darauf anwenden können. Sie müssen die mathematischen Aufgabenstellungen unterstützt von ihren Partnern aus der Biologie selbst herausarbeiten. Diese müssen andererseits soweit der mathematischen Sprache mächtig sein, dass sie die Grundstrukturen der Modelle verstehen können. Und sie müssen einsehen, dass Mathematisierung Abstraktion bedeutet, dass nicht

sämtliche Details eines Prozesses nachgebildet werden können und dass man sich über die zeitliche und räumliche Auflösung einigen muss, bevor man an den Entwurf eines ersten noch konzeptuellen Modells geht.

Die obigen Modellansätze verwenden mathematische Methoden auf unterschiedlichem Niveau. Die zeitdiskreten populationsdynamischen Ansätze lassen sich direkt aus biologischen konzeptuellen Modellen z.B. den Lebenszyklusgraphen ableiten. Die räumliche Verteilung von Pollen und Samen wird durch plausible Verteilungsfunktionen vom Gauß-Typ beschrieben. Die Implementierung dieser Ansätze in ein Programm ist einfach und verlangt keine tieferen Kenntnisse in numerischen Verfahren oder der Vektoranalysis. Diese Klasse von Modellen ist gut geeignet für die Anwendung durch Biologen oder für eine Zusammenarbeit von Modellierern mit Biologen, da letztere die Umsetzung der biologischen Prozesse in das Modell leicht nachvollziehen können. Die meisten Modellparameter haben hier eine unmittelbare biologische Bedeutung, so dass selbst beim Fehlen exakter Daten biologisch sinnvolle Intervalle für die Parameter angegeben werden können.

Die Verwendung von gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen ermöglicht eine hoch aggregierte mathematisch homogene Modellformulierung für Ausbreitungstransport und kontinuierliche populationsdynamische Prozesse. Die Aufstellung und numerische Behandlung von Modellen dieser Klasse setzt vertiefte Kenntnisse der Vektoranalysis und numerischer Methoden voraus. Damit ist klar, dass diese nicht mehr unmittelbar zum interdisziplinären Dialog zwischen Biologen und mathematischen Modellierern geeignet sind.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Rolle der Informatik, auf die in dieser Abhandlung nicht eingegangen werden konnte. Unserer Meinung nach ist eine Synthese von Biomathematik und Bioinformatik notwendig, um die Komplexität lebender Systeme erfassen zu können.

Im Vergleich zu der langen Tradition in der Physik hat die Mathematisierung der Biologie gerade erst begonnen und stellt ein faszinierendes Forschungsfeld dar.

Literatur

ACOSTA, V.M., E. RIERA¹, G. RODRIGUEZ, A. PINTO, A. CARDONI & J.A. GALLEGU-JUÁREZ 2012: Acoustic-Structure Interaction Modeling of Piezoelectric Transducer in Fluid Medium, COMSOL Multiphysics Conference, Milano.

BECKIE, H.J. 2006: Herbicide-Resistant Weeds: Management Tactics and Practices. *Weed Technology* **20**: 793–814.

COSTERTON, J.W. 1995: Overview of microbial biofilms, *Journal of Industrial Microbiology*, **15**: 137–140.

DE ANGELIS, D.L. & L.J. GROSS 1992: Individual-Based Models and Approaches in Ecology: Populations, Communities and Ecosystems. Chapman and Hall, New York, NY.

HEAP, I.M. 1997: The Occurrence of Herbicide-Resistant Weeds Worldwide. *Pesticide Science* **51**: 235–243.

JANOTT, M., S. GAYLER, A. GESSLER, M. JAVAUX, C. Klier & M. PRIESACK 2011: A one-dimensional model of water flow in soil-plant systems based on plant architecture. *Plant Soil* **341**: 233–256.

KIM, J.-W., H. CHOI & Y.A. PACHEPSKY 2010: Biofilm morphology as related to the porous media clogging. *Wat. Res.* **44**(4): 1193–1201. doi:10.1016/j.watres.2009.05.049.

PAHALAWATTARACHI, V., C.S. PURUSHOTHAMAN & A. VENNILA 2009: Metal phytoremediation potential of *Rhizophora mucronata* (Lam.). *Indian Journal of Marine Sciences* Vol. **38**(2): 178–183.

PARK, A., H.-H. JEONG, J. LEE, K. KIM & C.S. LEE 2011: Effect of shear stress on the formation of bacterial biofilm in a microfluidic channel. *BioChip Journal* **5**(3): 236–241. doi:10.1007/s13206-011-5307-9.

RANJARD, L. & A. RICHARME 2001: Quantitative and qualitative microscale distribution of bacteria in soil. *Research in Microbiology* **152**(8): 707–716. doi:10.1016/S0923-2508(01)01251-7.

POWLES, S.B. & Q. YU 2010: Evolution in Action: Plants Resistant to Herbicides. *Annual Review of Plant Biology* **61**: 317–349.

RICHTER, O. 2005: Mathematik in der Biologie: Geschichte, Konzepte und Anwendungen. *Abhandlungen der Braunschweiger Wissenschaftlichen Gesellschaft*, Band 54.

RICHTER, O., H.A. NGUYEN & V.P. NGUYEN 2013: Modeling Phytoremediation by Mangroves, *Comsol Conference*, Rotterdam.

SÖNDGERATH, D. & O. RICHTER 1990: An Extension of the Leslie Matrix Model for Describing Population Dynamics of Species with Several Development Stages. *Biometrics* **46**: 595–607.

WEY, A.S. VAN, A.L. COOKSON, T.K. SOBOLEVA, N.C. ROY, W.C. McNABB, A. BRIDIER, R. BRIANDET & P.R. SHORTEN 2012: Anisotropic nutrient transport in three-dimensional single species bacterial biofilms. *Biotechnol. Bioeng.* **109**(5): 1280–1292. doi:10.1002/bit.24390.

WOOD, B.D. & S. WHITAKER 2000: Multi-species diffusion and reaction in biofilms and cellular media. *Chem. Eng. Sci.* **55**(17): 3397–3418.

Trusted Communities – Social Metaphors for Technical Systems*

CHRISTIAN MÜLLER-SCHLOER

Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 4, D-30167 Hannover

The complexity of technical systems – especially in the area of embedded systems – has increased dramatically. Reasons for the increase are the higher integration of circuits, shorter clock periods and lower power consumption leading to a miniaturization of microprocessors, microcontrollers and Systems on Chip. A result is the development and marketing of ubiquitous devices like small PCs, handhelds, cell or smart phones. In addition, several of these systems and devices are interconnected by busses or via the Internet. An example is a modern car, which contains up to 100 microcontrollers running crucial tasks like ABS, ESP, engine control, and the navigation system. It is obvious that programming them and their interactions is highly complex, especially if real-time aspects have to be considered. It is a grand challenge to develop and maintain such highly integrated and often distributed systems.

As a response, the Organic Computing (OC) Initiative was founded in 2002. It deals with theoretical and practical foundations to handle the complexity of technical systems described above, inspired by mechanisms found in nature and biology. Several research projects in the scope of the initiative were initiated in the last years. The work presented in [1] gives a good overview.

A typical property of OC systems is that they consist of interacting autonomous entities (e.g. the microcontrollers in the car). In the following, we call such autonomous entities *agents*. The interactions of the agents depend strongly on several conditions: Do the agents belong to the same owner (like in the car) or do they belong to different owners (like bidding agents of different eBay users)? If the agents belong to the same owner we can assume that they will cooperate. But if they belong to different owners, cooperation between them is not self-evident: The bidding agents of different eBay users will try to win the auction and to minimize the price for their owner. Agents in such open systems are at least self-interested, but could also act selfishly or outright maliciously.

* Der Vortrag wurde am 11.10.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

Therefore, it is necessary that agents in OC systems become social agents, i.e. they must be aware not only of their environment but also of other agents. We define awareness of an agent as its ability to collect, store, aggregate, and use information about itself, about other agents and the environment. Awareness in a technical system can be classified into different types of observations and derived knowledge about "the world". We distinguish five classes of knowledge:

1. Self-knowledge: The knowledge of the agent about itself, its internal state and its abilities.
2. Knowledge about interaction partners: In order to interact properly the agent wants to be able to predict the future behaviour of its partners. The usual social concept for this is trust. A certain trust value is derived from past experience with this partner. Was he reliable? Did he ever try to cheat? Did he deliver correct results? What are his goals, and do they match or oppose my own objectives?
3. Knowledge about the community: A community is a set of agents, which belong together in some sense (e.g. because they serve the same user or they work on the same task). Therefore it is useful if the agents know about the number of agents and the individual capabilities of the community's agents even if they do not interact. This makes sense because if an agent is failing another agent of the community can replace it. More information about the community, which might be useful for making decisions, would be: the average workload of other agents, their reputation (i.e. what others think about an agent) or an impending system shutdown.
4. Knowledge about the institution: Human societies have invented institutions which (i) have a wider view than a single individual and (ii) are able to support or modify the interactions of the individuals. Examples are the government or a court of justice. In order to achieve this vertical interaction individual agents need specific knowledge like: What are the rules (the laws) I have to obey? What are the sanctions if I break the rules? And, on a meta-level: How can I change these rules?
5. Knowledge about the environment: The agents need to know or to learn important properties of their environment. Is it static or dynamic? Are there obstacles to be avoided?

We call the knowledge types (2)–(4) social awareness because they comprise knowledge describing the relations of the different agents. An agent that is able to collect and use such social information is a social agent. Viewing technical systems as autonomous entities interacting with their environment and with other similar entities opens a whole range of new possibilities how to build such agents: Social agents mimic human societies. Should we then set out and study the mechanisms of natural (human) societies and simply transfer them into technical systems? Since this cannot be an end in itself we have to ask critically why we are doing this.

We are concerned with building complex technical systems consisting of (semi-) autonomous subsystems, which we model in terms of agents. This approach is not

to be confused with sociotechnical systems where the focus is on the interaction of people and systems¹. The benefit of transferring social behaviour into technical systems is to optimise the interactions between different agents: Agents know with which other agents they can cooperate (thus accelerating task execution) and which agents have different goals (which leads to competition).

It is not our goal to mimic or simulate human social systems in order to gain a deeper insight into their mechanisms. While this is a worthwhile endeavour, all we want to achieve is an improvement of the technical system. We adopt (human) social mechanisms only if they help us. And we change them whenever this is beneficial.

In this talk we discuss the reasons why it is beneficial for agents to go beyond the purely “rational” agent behaviour, using the prisoner’s dilemma. Then we discuss the requirements for social agents to organize themselves into sustainable – or enduring – institutions. We will use Elinor Ostrom’s template for such an “Enduring Institution” [3] who has shown that social awareness is necessary whenever a group of agents competes for limited resources. In the following we will have a closer look at Trusted Communities – our implementation of a society of social agents – and the individual technical agents who constitute such a community. We show that self-organization of social systems is possible but it will also become clear that we need more institutional mechanisms in order to drive an agent community into a desirable direction. Therefore, we will analyse in how far we can transfer additional social mechanisms from Ostrom’s eight principles to our technical societies.

In conclusion we reflect on our methodology used in this research: The transfer of social mechanisms into technical systems. We conclude that doing so we use (natural) societies as *metaphors* rather than modelling them.

References

- [1] MÜLLER-SCHLOER, C., H. SCHMECK & T. UNGERER eds. 2011: Organic Computing – A Paradigm Shift for Complex Systems. Birkhäuser.
- [2] CHURCHMAN, C. 1968: The systems approach. Number Parts 1–4 in Delta book. Delacorte Press.
- [3] OSTROM, E. 1990: Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Political Economy of Institutions and Decisions. Cambridge University Press.

¹ Sociotechnical systems (STS) in organizational development [2] is an approach to complex organizational work design that recognizes the interaction between people and technology in workplaces. The term also refers to the interaction between society’s complex infrastructures and human behaviour. In this sense, society itself, and most of its substructures, are complex sociotechnical systems.

Virtuelle Realität und Haptik*

FRANZ-ERICH WOLTER

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover,
Institut f. Mensch-Maschine-Kommunikation, FG GDV
Welfengarten 1, D-30167 Hannover

In der Virtuellen Realität einem Teilgebiet der Informatik werden rechnergestützte Systeme entwickelt, die es ermöglichen einen Menschen in eine rechnergenerierte drei-dimensionale Welt einzubetten und diese Umgebung visuell, akustisch und auch mit dem Tastsinn (haptisch) wahrzunehmen. (Haptik ist die Lehre vom Tastsinn.) Die Entwicklung von VR-Systemen, die visuelle und akustische Wahrnehmung ermöglichen, hat seit einigen Jahren eine gewisse Reife erreicht. Dagegen ist das Einbeziehen der haptischen Wahrnehmung, mit der man rechnergenerierte physische Objekte nicht nur sehen, sondern gleichzeitig fühlen, ggf. deformieren und bewegen kann, immer noch ein schwieriges Problem. Ein zentraler Teil der menschlichen Wahrnehmung inkl. der Eigenwahrnehmung ist haptisch und wird im wesentlichen durch die Haut vermittelt, die mit ca. zwei Quadratmetern das größte Sinnesorgan des Menschen darstellt. Deswegen gab es Forschungsanstrengungen, die haptische Wahrnehmung in VR-Systeme mit einzubeziehen.

Zur Erweiterung der haptischen Wahrnehmung, war es ein weiteres Ziel, Systeme zu entwickeln, die durch Kontakt mit der Haut eines Fingers die taktile (feinfühlig) Wahrnehmung erzeugen, die beim Streichen über die Oberfläche eines Materials z.B. eines Textils entsteht.

Im Rahmen des EU-geförderten HAPTEX-Projektes (HAPtic sensing of virtual TEXTiles) gelang es (2007) erstmalig, ein visuell-haptisch-taktilen-VR-System zu entwickeln, das den haptisch/taktilen Eindruck beim Erfühlen und Deformieren eines Textil-Stoffes vermittelt. Bezüglich der simultanen visuell-haptisch-taktilen Wahrnehmung ist dieses System immer noch Stand der aktuellen Forschung. *Bei diesem Projekt war das Welfenlab für die Modellbildung und Softwareentwicklung zuständig, die zur Darstellung der haptisch/taktilen Wahrnehmung und Interaktion mit dem Textil benötigt wurde und dabei die unterschiedlichen physikalischen Materialeigenschaften der jeweils verschiedenen Textilien berücksichtigte.*

Inzwischen wurde am Welfenlab ein neues VR-System entwickelt, das es ermöglicht mit medizinischen 3D-Volumendaten des Körperinneren, die Organe

* Der Vortrag wurde am 8.11.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in Hannover gehalten.

darstellen und etwa von einer Computertomographie stammen, haptisch/visuell zu interagieren. Dies kann z.B. von Chirurgen zur haptisch unterstützten Rekonstruktion von Knochen aus vielen Bruchstücken zwecks Operationsplanung bei einem komplizierten Knochenbruch verwendet werden.

Im Rahmen eines neuen vom Welfenlab koordinierten DFG-Projekt wird derzeit der taktile Wahrnehmungssinn vertiefend untersucht und gemeinsam mit dem Institut für Mikroproduktionstechnik (LUH) und dem Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) ein neues Display zur verbesserten Erzeugung von taktilen Wahrnehmungen

Klassensitzungen

Klima- und Umweltberichte aus der Tiefe von Seen*

ANTJE SCHWALB

Institut für Geosysteme und Bioindikation der TU Braunschweig
Langer Kamp 19c, D-38106 Braunschweig

Seen sind dynamische Systeme, die auf Umweltänderungen reagieren und diese archivieren. Eine junge Geowissenschaft an der aktuellen Forschungsfront ist die Limnogeologie. Sie bildet die Schnittstelle von naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung und angewandter Forschung bis hin zu den Geisteswissenschaften und umfasst die natürliche Klima- und Umweltgeschichte von der frühen Erdgeschichte bis zu den Auswirkungen von anthropogenen Aktivitäten seit der Ur- und Frühgeschichte. Die Limnogeologie stellt grundlegende Informationen zur Verfügung, die für ein breites Forschungsspektrum von grosser Bedeutung sind. Dazu gehören derzeit insbesondere die folgenden vier Schwerpunktthemen:

- (1) Die Industrie ist zunehmend an Seebecken und ihrem Rohstoffpotenzial interessiert, insbesondere im Bereich Erdöl, Erdgas und Salz/Leichtmetalle.
- (2) Fragen zur Paläoklimatologie haben das Interesse auf die globale Bedeutung von kontinentalen Klima- und Umweltarchiven gelenkt, das sich in der zunehmenden Anzahl an Bohrungen des „International Continental Scientific Drilling (ICDP)“ ausdrückt. Diese Initiativen werden durch Untersuchungen der Klimaeinflüsse auf moderne Seen und ihr biologisches Inventar ergänzt. Fragen des Globalen Klimawandels stimulieren auch das Interesse an der Paläographie früherer Kontinent-Konfigurationen. Eine detaillierte sedimentologische Analyse rezenter und alter Langzeitseen, die seit mehreren Millionen von Jahren existieren, ist notwendig, um die tektonischen, klimatischen und anthropogenen Einflüsse auf die Seesedimentation zu charakterisieren und zu unterscheiden.
- (3) Seen mit extremen Lebensbedingungen fungierten möglicherweise als „Brut-schränke“ für die Biodiversität und haben das Potenzial, das Verständnis der Evolution vielfältiger, nicht-mariner, Organismen voranzutreiben.
- (4) Seesedimente liefern kritische Information zum Verschmutzungsgrad, zur Nährstoffentwicklung und zur Ökotoxikologie; Referenzzustände zur Beurteilung von Wasserqualität und zum anthropogenen Einfluss auf die Umwelt im globalen Massstab sowie auf einzelne, lokale Seeökosysteme (Smol, 2008).

* Der Vortrag wurde am 08.02.2013 vor der Klasse für Mathematik der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

Seesedimente haben den großen Vorteil, dass sie Klima- und Umweltveränderungen im See und seinem Einzugsgebiet mit hoher zeitlicher Auflösung speichern. Im Seeschlamm begrabene Klima- und Umweltindikatoren wie Kleinstlebewesen, Algen, Pollenkörner sind Bioindikatoren (Pérez et al., 2013), die zusammen mit mikrometerkleinen Gesteins- und Pflanzenresten als Zeitzeugen genutzt werden können, deren Analyse eine detaillierte Reise in die Vergangenheit erlaubt (Cohen, 2003; Schwalb et al., 2007). Als indirekte Anzeiger oder „Proxies“ ermöglichen sie zum Beispiel die Rekonstruktion von Nährstoffgehalten im Wasser, der Leitfähigkeit und des pH-Wertes, sowie der Änderung von Seespiegeln (Frenzel et al., 2010; Wrozyńska et al., 2010). Letztere sind wichtige Indikatoren für Änderungen im hydrologischen Kreislauf. Besonders wertvolle Bioindikatoren sind solche mit sehr eng definierten ökologischen Ansprüchen. Anhand von heute in aquatischen Milieus mit bekannten Charakteristika (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert u.a.) lebenden Organismen werden Trainingssets erstellt, von denen sog. „Transfer-Funktionen“ abgeleitet werden. Diese werden anschließend auf Datensätze fossiler Artenvergesellschaftungen angewendet, um Umweltveränderungen über die Zeit quantitativ abzuleiten und um zukünftige Klimaänderungen abzuschätzen.

Fluss- und Landschaftsdynamik im Umfeld späteiszeitlicher Lagerplätze

Späteiszeitliche Stillwassersedimente verlandeter Flussmäander dokumentieren z.B. die Fluss- und Landschaftsdynamik im Umfeld späteiszeitlicher Lagerplätze bei Grabow und Weitsche (Elbe-Jeetzel-Niederung, Nordostniedersachsen). Die Sedimente dokumentieren den typischen Wandel der Flusslandschaft von periglazialer Kältesteppe mit Braided-River-System zur späteiszeitlichen sich schließenden Waldlandschaft mit breitem mäandrierendem Flussverlauf (Turner et al., 2013). In situ-Funde von Feuerstein- und Bernsteinartefakten sowie von Holzkohle und Knochen in vom mäandrierenden System abgelagerten Hochflutsedimenten ermöglichen es zudem, über multidisziplinäre geowissenschaftliche Untersuchungen die späteiszeitliche Besiedlung direkt mit der Landschaftsentwicklung zu verknüpfen. Die Rekonstruktionen zeigen für die Federmesser-Siedlungsphase eine sehr vielfältige Flusslandschaft im Elbe-Urstromtal mit Fließgewässern, Stillgewässern und Feuchtgebieten, eine Sondersituation innerhalb sich schließender Birkenwälder des frühen Allerøds vor ca. 13.000 Jahren. Die Analysen belegen daneben den erhöhten Eintrag von Holzkohlepartikeln in Hochflut- und Stillwassersedimente während der Siedlungsphase, demonstrieren damit sowohl die im Spätglazial schnell wechselnden Klima- und Umweltbedingungen im Umfeld der Siedlungsplätze, und geben aber auch erstmals Hinweise auf eine (kleinräumige) direkte Beeinflussung der Umwelt durch die Federmessergruppen (Turner et al., 2013).

Schmelzwasserproduktion und Temperaturen

Die spätglaziale Wärmephase endete abrupt vor ca. 12.700 Jahren mit dem Einsetzen der Jüngeren Dryas, der letzten Kältephase vor Beginn unserer heutigen Warmzeit, dem Holozän. Stabile Sauerstoffisotope, gemessen an Kalkschalen von Ostracoden, ca. 1 mm langen Muschelkrebse, aus den Sedimenten des Bodensees belegen einen Temperaturrückgang von ca. 7°C im Einzugsgebiet des Bodensees zu Beginn der Jüngeren Dryas innerhalb von 30 Jahren (Schwalb et al., 2013). Dieser Kälterückschlag wurde vermutlich durch den Eintrag von Schmelzwasser vom nordamerikanischen Kontinent in den Nordatlantik ausgelöst, der durch die Bildung einer Frischwasserlinse zum Unterbruch des Wärmetransports in den nördlichen Nordatlantik führte (u.a. Berger, 1990) und somit zum Abschalten unserer Fernwärmeheizung. Vor ca. 11.600 Jahren sprang diese wieder an, und das Holozän begann. Dieses Beispiel macht deutlich, wie z.B. ein verstärkter Eintrag von Schmelzwasser, wie er heute in Folge der Globalen Erwärmung verstärkt statt findet, zunächst zu einer drastischen und schnellen Abkühlung führen könnte.

Literaturhinweise

BERGER, W.H. 1990: The Younger Dryas cold spell – a quest for causes. *Global and Planetary Change* **3**(3): 219–237.

COHEN, A. 2003: *Paleolimnology, The History and Evolution of Lake Systems* New York, Oxford University Press.

FRENZEL, P., C. WROZYNA, M. XIE, L. ZHU, & A. SCHWALB 2010: Palaeo-water depth estimation for a 600-year record from Nam Co (Tibet) using an ostracod-based transfer function. *Quaternary International* **218**: 157–165. doi:10.1016/j.quaint.2009.06.010

PÉREZ, L., J. LORENSCHAT, J. MASSAFERRO, C. PAILLES, F. SYLVESTRE, W. HOLLWEDEL, G.-O. BRANDORFF, M. BRENNER, G. ISLEBE, M. SOCORRO LOZANO, B. SCHARF & A. SCHWALB 2013: Bioindicators of climate and trophic state in lowland and highland aquatic ecosystems of the northern Neotropics. *International Journal of Tropical Biology and Conservation Revista de Biología Tropical* **61**(2): 603–644.

SMOL, J.P. 2008: *Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective – 2nd Edition*. Blackwell Publishing, Oxford. 383 pp.

SCHWALB, A., 2003: Lacustrine ostracodes as stable isotope recorders of late-glacial and holocene environmental dynamics and climate. D.G. Frey and E.S. Deevey Review #3. *J. Paleolim.* **29**(3): 265–351.

SCHWALB, A., P. STEEB, C. WROZYNA, R. MÄUSBACHER, G. DAUT, J. WALLNER, E. KROEMER, G. GLEIXNER, I. MÜGLER, D. SACHSE, V. MOSBRUGGER, B. SCHÜTT & J. BERKING 2007: Das Dach der Welt als Klimasensor. *Das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft*, 2/2007, 4–7.

TURNER, F., J.F. TOLKSDORF, F.A. VIEHBERG, A. SCHWALB, K. KAISER, K., F. BITTMANN, U. VON BRAMANN, R. POTT, U. STAESCHE, K. BREEST & S. VEIL 2013: Lateglacial/early Holocene fluvial reactions of the Jeetzel river (Elbe valley, Northern-Germany) to abrupt climatic and environmental changes. *Quaternary Science Reviews* **60**: 91–109, DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.10.037

WROZYNA, C., P. FRENZEL, A. MACKENSEN, P. STEEB, R. VAN GELDERN, L. ZHU & A. SCHWALB 2010: Stable isotope and ostracode species association evidence for lake level changes of Nam Co, southern Tibet, during the past 600 years. *Quaternary International* **212**: 2–13. doi:10.1016/j.quaint.2008.12.010

Kann man messen, ob eine Zahl rational ist? – Ausbreitung und Spektrum in einem einfachen Quantensystem*

REINHARD F. WERNER

Institut für Theoretische Physik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 2, D-30167 Hannover

Wir betrachten die Dynamik eines einfachen Quantensystems: ein Atom in einem optischen Gitter, das sich in diskreten Schritten unter Wahrung der quantenmechanischen Kohärenz in einem äußeren Feld bewegt. Das Langzeitverhalten eines solchen Systems hängt dramatisch davon ab, ob das Feld ein rationales oder irrationales Vielfaches von 2π ist. In der Tat sieht man diesen qualitativen Unterschied auch im Experiment. Andererseits ist natürlich klar, dass ein experimenteller Parameter nur mit endlicher Genauigkeit eingestellt werden kann, der Unterschied zwischen rational und irrational also nie experimentell festgestellt werden kann.

Im Vortrag wird dieses Paradoxon aufgelöst durch eine Abschätzung der Empfindlichkeit, mit der Erwartungswerte zu endlichen Zeiten vom Feldparameter abhängen. Dabei stellt sich als entscheidendes Hilfsmittel die Kettenbruchentwicklung des Feldparameters heraus. An dieser Entwicklung kann man direkt die Qualität rationaler Approximationen ablesen, die dann Vorhersagen auf verschiedenen Zeitskalen möglich machen. Wir erhalten dadurch drei Klassen asymptotischen Verhaltens, die jeweils einem Spektraltyp (Punktspektrum, absolut stetiges Spektrum oder singularär stetiges Spektrum) entsprechen. Diese Typen lassen sich nur im Langzeitlimit, und entsprechend bei unendlich genau bekanntem Feldparameter unterscheiden, und lassen sich am asymptotischen Verhalten der Kettenbruchentwicklung ablesen.

Auf Beweise wird im Vortrag verzichtet und auch die Sätze werden eher qualitativ formuliert. Als allgemeinverständlicher mathematischer Inhalt wird ein wenig auf Kettenbrüche eingegangen, die uns erlauben präzise zu sagen, in welchem Sinn manche Zahlen irrationaler sind als andere.

* Kurzfassung des am 12.04.2013 vor der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrags.

Testing Relativity by Lunar Laser Ranging*

JÜRGEN MÜLLER^{1,2}, L. BISKUPEK¹, F. HOFMANN¹ AND E. MAI¹

¹Institut für Erdmessung (IfE), Leibniz Universität Hannover,
Schneiderberg 50, D-30167 Hannover, Germany

²QUEST – Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research,
Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, D-30167 Hannover, Germany

In 1969, a new era for studying relativity has started. With the first returns of laser pulses sent from observatories on Earth to reflector arrays on the Moon, a new space technique – Lunar Laser Ranging (LLR) – has been providing an ongoing time series of highly accurate Earth-Moon distance measurements.

LLR data analysis is carried out at the cm level of accuracy, for which all elements of the tracking process are modeled at appropriate (relativistic) approximation, i.e. the orbits of the major bodies of the solar system, the rotation of Earth and Moon, signal propagation, but also the involved reference and time systems as well as the time-variable positions of the observatories and reflectors, see [1] for more details.

We showed where relativity enters the LLR analysis and how the whole measurement process is modeled, including the major classical (Newtonian) effects like gravity field of Earth and Moon, tidal effects, ocean loading, lunar tidal acceleration (that causes the increase of the Earth-Moon distance by about 3.8 cm/year), etc.

By analyzing the 43-year record of range data, LLR is able to provide, among others, a dynamical realization of the International Celestial Reference System, parameters related to the selenocentric and terrestrial reference frames as well as (long-periodic) Earth Orientation Parameters.

Particularly, LLR is one of the best tools to test General Relativity in the solar system. It allows for constraining gravitational physics parameters related to the strong equivalence principle [2], geodetic precession, preferred-frame effects, or the time variability of the gravitational constant, [1], [3]. Recent results, especially, for the various relativistic parameters were presented, see Table 1.

* Kurzfassung eines vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften am 08.02.2013 gehaltenen Vortrags mit dem Titel: Test der Relativitätstheorie mit Lasermessungen zum Mond.

Table 1. IfE results for various relativistic parameters and estimated „realistic” errors.

Parameter	Results
Nordtvedt parameter η (test of the strong equivalence principle)	$(2.0 \pm 4.0) \times 10^{-4}$
Time variable gravitational constant \dot{G}/G [yr^{-1}] \ddot{G}/G [yr^{-2}]	$(1.4 \pm 1.5) \times 10^{-13}$ $(4.0 \pm 5.0) \times 10^{-15}$
Geodetic precession [$''/\text{cy}$] (difference to predicted value of $1.92''/\text{cy}$ in general relativity)	$(-0.6 \pm 1.0) \times 10^{-2}$
Metric parameter $\gamma - 1$ (space curvature)	$(3.0 \pm 4.0) \times 10^{-3}$
Metric parameter $\beta - 1$ (non-linearity) $\beta - 1$ using $\eta = 4\beta - \gamma_{\text{Cassini}} - 3$ with $\gamma_{\text{Cassini}} - 1 = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$	$(1.7 \pm 2.0) \times 10^{-3}$ $(0.6 \pm 1.1) \times 10^{-4}$
Preferred-frame effect within special relativity $\zeta_1 - \zeta_0 - 1$	$(-0.5 \pm 1.2) \times 10^{-4}$
Preferred-frame effect α_1 α_2 (coupled with the velocity of the solar system)	$(3.0 \pm 3.0) \times 10^{-5}$ $(2.0 \pm 2.0) \times 10^{-5}$
Preferred-frame effect α_1 (coupled with the dynamics within the solar system)	$(1.6 \pm 3.0) \times 10^{-3}$
Influence of dark matter δ_{gc} [cm/s^2] (in direction to the galactic center, equivalence principle test)	$(0.0 \pm 2.0) \times 10^{-14}$

References

- [1] MÜLLER, J., L. BISKUPEK, F. HOFMANN & E. MAI 2014: Lunar Laser Ranging and Relativity. Book chapter in “Frontiers in Relativistic Celestial Mechanics”, Vol. 2 (ed. by S. KOPEIKIN), de Gruyter, in press.
- [2] MÜLLER, J., F. HOFMANN & L. BISKUPEK 2012: Testing various facets of the equivalence principle using Lunar Laser Ranging. Classical and quantum gravity, Vol. 29, 184006, doi:10.1088/0264-9381/29/18/184006
- [3] MÜLLER, J., F. HOFMANN, X. FANG & L. BISKUPEK 2014: Lunar Laser Ranging: recent results based on refined modelling. In: Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet (eds. C. RIZOS & P. WILLIS). IAG Symposia Series, Springer, Vol. 139, p. 447–452.

Zur Modellierung und Simulation von Turbulenz*

MANFRED KRAFCZYK

Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen (iRMB)
TU Braunschweig, Pockelsstraße 3, D-38106 Braunschweig

Das Verständnis von Strömungen gasförmiger oder flüssiger Medien ist von überragender Bedeutung zum Verständnis und der Vorhersage komplexer Problemstellungen in einer Vielzahl von Disziplinen. Hier seien ohne Anspruch auf Vollständigkeit beispielhaft genannt:

- Umwelt (Gewässer, Atmosphäre, Klima, Erdmantel, ...)
- Halbleiterindustrie (Mikroelektronikherstellung und -betrieb)
- Verfahrenstechnik (chemische Reaktoren, Wärmetauscher, Produktionsanlagen, ...)
- Maschinenbau (Aerodynamik, Strömungsakustik, Fluid-Struktur-Interaktionen, ...)
- Bauingenieurwesen (Wind/Wellenlasten auf gebaute Infrastruktur, Schadstoffausbreitung, ...)
- Biomechanik (Blutströmung, Atmung, Stoffkreislauf, ...)
- Astrophysik u.v.a.

Die intellektuelle Auseinandersetzung des menschlichen Geistes mit Strömungen geht sicherlich bis in das Altertum zurück. Obwohl die Anfänge dieser Auseinandersetzung oftmals im Kontext mit Heraklit von Ephesos (520–460 v. Chr.) und dem ihm zugeordneten Aphorismus πάντα ῥεῖ («Alles fließt» [1]) zitiert werden, handelt es sich dabei jedoch wohl eher um eine philosophische Reflektion über die stete Wandlung in der Welt als um einen gedanklichen Durchdringungsversuch der zugrundeliegenden physikalischen Aspekte von Strömungsphänomenen.

Im fünfzehnten Jahrhundert hat sich Leonardo da Vinci intensiv mit dem Element Wasser beschäftigt. Dies begann mit seinen bekannten Skizzen des heute als Turbulenz bekannten Phänomens (siehe beispielsweise Abbildung 1) und seinen dazu überlieferten Anmerkungen *“Observe the motion of the surface of the water, how it resembles that of hair, which has two motions, one depends on the weight*

* Der Vortrag wurde am 12.04.2013 vor der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

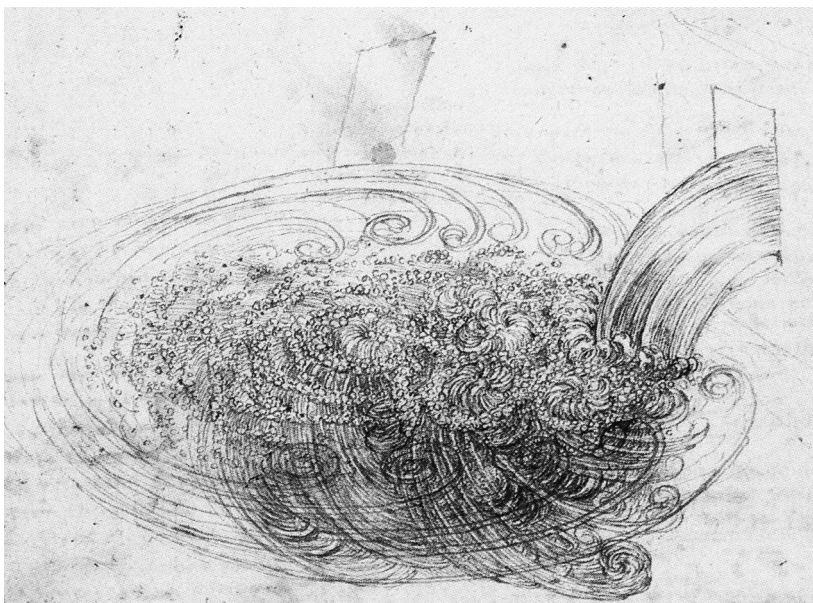


Abb. 1: Leonardo da Vinci (1452–1519), „Study of water falling into still water“, c. 1508–9.

of the hair; the other on the direction of the curls; thus the water forms whirling eddies, one part following the impetus of the chief current, and the other following the incidental motion and return flow.“ und reichte bis zum Entwurf von wassergetriebenen Maschinen (siehe Abbildung 2).

Heute ist wissenschaftlicher Konsens, dass sich das Phänomen der Strömungsturbulenz *im Prinzip* durch die Lösungen der Impulsgleichungen von Navier und Stokes

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)(\rho\vec{v}) = -\nabla p + \mu\Delta(\rho\vec{v})$$

welche diese unabhängig 1845 bzw. 1827 hergeleitet hatten, in Verbindung mit der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}) = 0$$

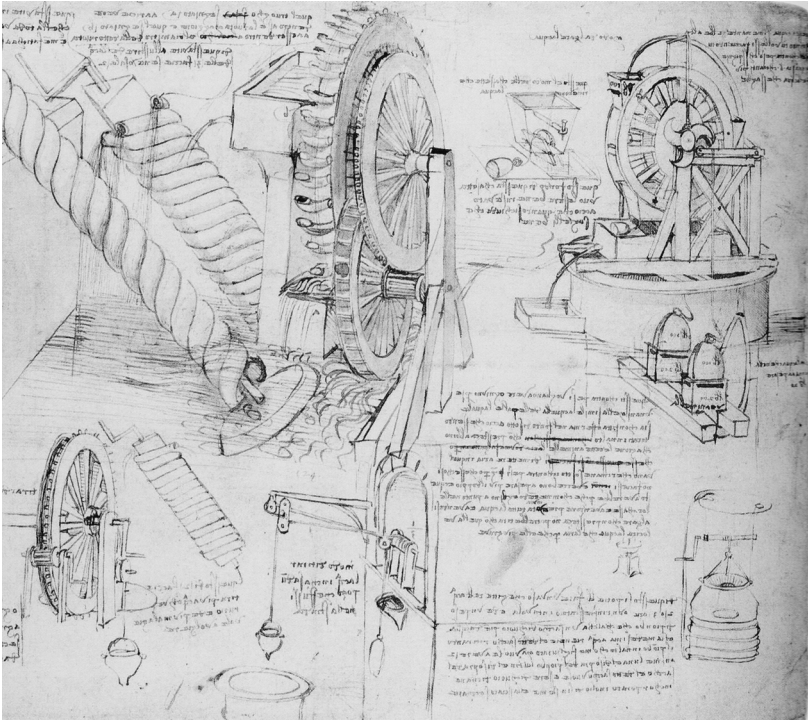


Abb. 2: Leonardo Da Vinci – Entwurf einer Wasserhebeeinrichtung, 1480. (Biblioteca Ambrosiana, Mailand, Italien)

welche die Massenerhaltung charakterisiert, beschreiben lässt. Dabei charakterisiert \vec{v} das (gesuchte) raumzeitlich veränderliche Strömungsfeld, ρ die Dichte des Fluids und p das zu \vec{v} passende Druckfeld, welches im inkompressiblen Fall durch Lösung der Poisson-Gleichung und im kompressiblen Fall durch Berücksichtigung der Energiegleichung in Verbindung mit der dem Problem angepassten thermodynamischen Zustandsgleichung ermittelbar ist. Als weitere Materialgröße geht neben der Dichte die dynamische Zähigkeit μ ein. Leider ist bisher aus mathematischer Sicht noch immer nicht zweifelsfrei geklärt, ob für die o.a. partiellen Differentialgleichungen für sinnvolle Anfangsbedingungen eine eindeutige Lösung existiert [7]. Daraus folgt natürlich auch, dass wir bisher insbesondere für turbulente Strömungen keine allgemein gültigen analytischen Lösungen kennen, sondern typischerweise gezwungen sind, mit numerischen Methoden Näherungslösungen für die Modellgleichungen zu finden, die es experimentell zu validieren gilt. Leider kann man zeigen, dass der Berechnungsaufwand für solche Näherungslösungen im wesentlichen kubisch mit der Referenzbezugsgröße, der

Bezugsgeschwindigkeit und dem Kehrwert der Viskosität wächst, weswegen für praxisrelevante Strömungsprobleme, die von Turbulenz geprägt sind, eine hinreichend genaue Berechnung numerischer Lösungen der Navier-Stokes Gleichungen mit vorhandenen Rechnerkapazitäten in angemessener Zeit nicht möglich ist.

Eine wesentliche Eigenschaft turbulenter Strömungen ist die Existenz dynamischer Strukturen über einen großen Bereich von Längen- und Zeitskalen, die aus physikalischer Sicht den immensen Aufwand für entsprechende numerische Lösungen plausibilisieren. Für die Analyse und Prognose anwendungsrelevanter turbulenter Strömungen ist es jedoch meist nicht von Interesse, das Lösungsverhalten auf den kleinsten Skalen zu kennen, da ein Großteil der kinetischen Energie in den mittleren und größeren Skalen enthalten ist. Es stellt sich also die Frage, wie man zu Modellgleichungen kommt, die die impliziten Auswirkungen der kleinskaligen Strömungsdynamik auf technisch relevante Skalen konsistent beschreiben, ohne die Effekte auf den kleinsten Skalen explizit beschreiben zu müssen. Dieses Problem ist die Aufgabe der Turbulenzmodellierung. Typischerweise wird dazu das unbekannte Strömungsfeld hypothetisch in einen raumzeitlichen Mittelwert und fluktuierende Anteile zerlegt. Setzt man eine solche Zerlegung in die Navier-Stokes Gleichungen ein, resultieren wieder strukturell ähnliche Terme für die Mittelwerte, die jedoch durch nichtlineare Terme von Mittelwerten der Produkte von Komponenten der Fluktuationen, den sog. Reynoldsspannungen, ergänzt werden. Für eine Schließung des Problems müssen daher Annahmen getroffen werden, wie diese Komponenten der Reynoldsspannungen von den gemittelten Größen abhängen. Ein noch heute weitverbreiteter Ansatz basiert auf Arbeiten von Boussinesq [8], bei dem Turbulenz durch zusätzlichen dynamische Effekte charakterisiert wird, die sich als einer der materiellen Zähigkeit des Fluides überlagernden zusätzlichen turbulenten Scheinzähigkeit interpretieren lassen. Diese sog. turbulente oder Wirbelviskosität wird in vielen unterschiedlichen Varianten als Funktion der raumzeitlich gemittelten Strömungsfelder modelliert und erlaubt somit eine numerische Lösung der entsprechenden Transportgleichungen für die mittleren und größeren Skalen des Strömungsfeldes. Solche Modelle werden meist auch als Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) Ansätze bezeichnet.

Komplementär dazu verfolgen sog. Grobstrukturmodelle (Large Eddy Simulation, LES [9]) die Idee, das gesuchte Strömungsfeld formal einer räumlichen Filteroperation zu unterziehen, die glättende Eigenschaften hat. Das Einsetzen der gefilterten Funktion in die Navier-Stokes-Gleichungen resultiert wieder in fast identischen Gleichungen für die gefilterten Größen, welche jedoch von nichtlinearen ungefilterten Termen ergänzt werden. Da diese unbekannt sind, müssen sie wieder als Funktion gefilterter Größen modelliert werden, was zu einer Vielzahl von LES-Modellen führt. Eine vertiefte Übersicht über aktuelle RANS und LES Ansätze findet sich z.B. in [10]. Tendenziell lässt sich sagen, dass RANS-Modelle aufwändiger durch experimentelle Validierungen zu kalibrieren sind, dafür aber deutlich weniger rechenaufwändig sind, weswegen sie sich de facto zu einem

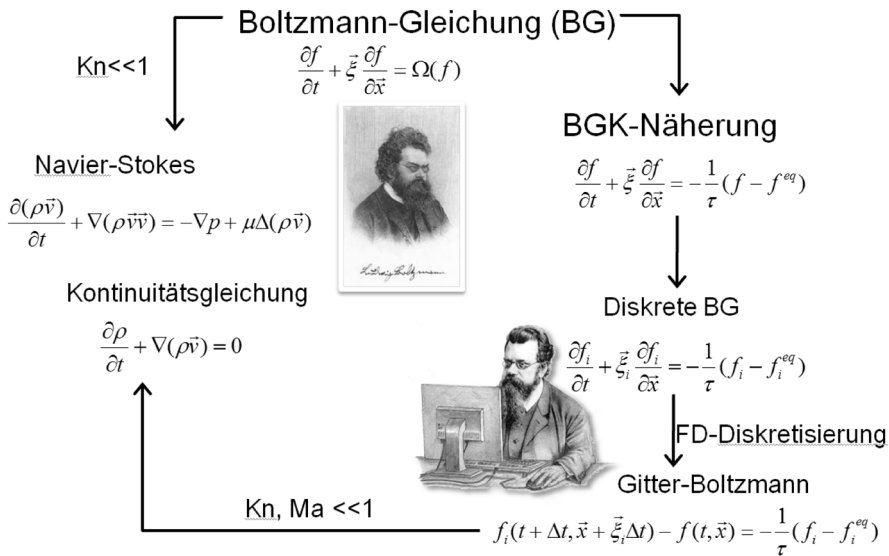


Abb. 3: Ableitung der Navier-Stokes-Gleichung aus der Boltzmann-Gleichung.

Industriestandard entwickelt haben. In den letzten Jahren gewinnen jedoch auch zunehmend LES-Simulationen an Bedeutung, die jedoch grundsätzlich dreidimensionale und zeitabhängige Berechnungen mit entsprechend deutlich höheren Rechenzeiten erfordern.

Ein in den letzten zwanzig Jahren entwickelter Ansatz zur Modellierung und Simulation von Transportphänomenen basiert auf einer vereinfachten Boltzmann-Gleichung. Es kann gezeigt werden, dass die Momente niederer Ordnung der Lösung solcher reduzierter Boltzmann-Gleichungen im Limes kleiner Knudsen- und Machzahlen auch Lösungen der entsprechenden inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen darstellen, wie in Abbildung 3 dargestellt ist.

Im Gegensatz zu den Navier-Stokes-Gleichungen besitzt die Gitter-Boltzmann-Gleichung einen linearen Advektionsterm, was die numerische Lösungsstrategie deutlich vereinfacht. Es zeigt sich, dass die hierfür zur Verfügung stehenden numerischen Verfahren sehr gut für die heute verfügbaren parallelen Rechnerarchitekturen geeignet sind, von denen insbesondere sog. General Purpose Graphics Processing Units, (GPGPUs) im Fokus stehen. Diese Architekturen dienen nicht mehr vorrangig der Berechnung von Visualisierungen (i.e. Bildschirmdarstellungen), sondern nehmen die Funktion numerischer Co-Prozessoren ein. Solche GPGPUs bestehen ihrerseits aus hunderten von sogenannten Kernen, auf denen ein Gesamtproblem parallel bearbeitet werden kann.

Entsprechend dem oben skizzierten Vorgehen können nun auch auf Basis der Gitter-Boltzmann Methode entsprechende Turbulenzmodelle realisiert werden. Nachfolgend dazu sei ein Berechnungsbeispiel angeführt, welches im Detail in [11] beschrieben ist. Für einen Querschnitt der Østbroen-Brücke (Abb. 6: Validierung der Druckverteilung auf der Ober- und Unterseite des Profils (Linie: num. Simulation, Symbole: Windkanalmessungen).) wurde eine LES-Simulation

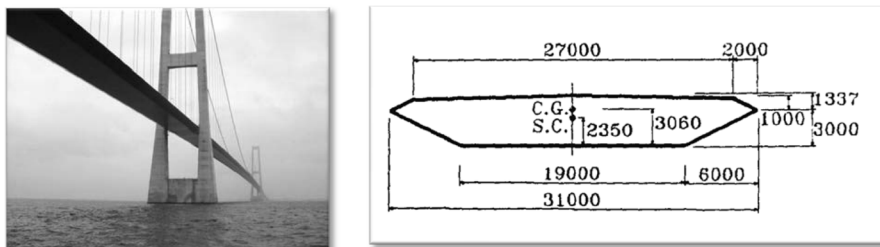


Abb. 4: Die Østbroen-Brücke überquert den Großen Belt, rechts ein Brückenquerschnitt.

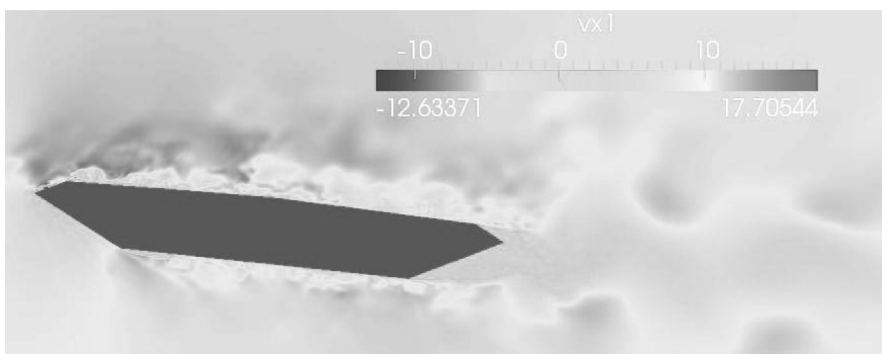


Abb. 5: Dreidimensionale LES-Simulation um den Brückenquerschnitt mit mehr als einer Milliarde Unbekannten.

durchgeführt (Abbildung 5), deren Druckverteilung über dem Querschnitt experimentell validiert wurde (Abb. 6: Validierung der Druckverteilung auf der Ober- und Unterseite des Profils (Linie: num. Simulation, Symbole: Windkanalmessungen).). Die Berechnungszeiten für dieses Beispiel liegen bei rund vier Tagen unter Nutzung von ca. zweihundert Prozessoren. Es ist davon auszugehen, dass die Nutzung von GPGPUs diese Rechenzeit auf wenige Stunden zu reduzieren erlaubt. Da

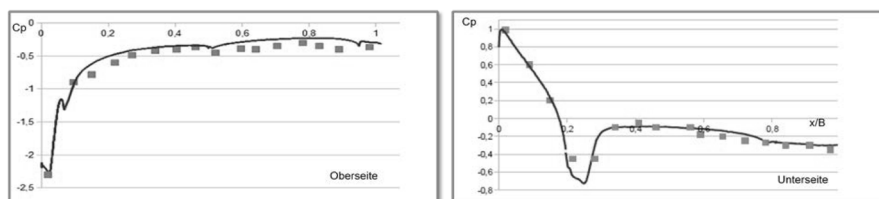


Abb. 6: Validierung der Druckverteilung auf der Ober- und Unterseite des Profils (Linie: num. Simulation, Symbole: Windkanalmessungen).

mit dieser Architektur nach den Erfahrungen in der Arbeitsgruppe des Autors in Bezug auf Anschaffungspreis und Unterhaltskosten eine Effizienzsteigerung von mindestens einer Größenordnung in Bezug auf konventionelle CPU-basierte Systeme möglich ist, macht insbesondere das günstige Preis-Leistungsverhältnis GPU-basierter Systeme diese für einen breiten Kreis von Industrieanwendern interessant, da somit erstmalig die Durchführung von sehr aufwändigen Turbulenzsimulationen möglich ist, ohne massiv in entsprechende Hardware und Systemadministration für einen Parallelrechner investieren zu müssen. Voraussetzung zur Nutzung GPU-basierter Simulationen ist allerdings eine Anpassung der problemspezifischen Berechnungsverfahren an die GPU-spezifische Speicher- und Prozessstruktur. Dies gilt natürlich auch für die entsprechenden numerischen Verfahren zur Simulation turbulenter Strömungen.

Zusammenfassung und Ausblick

Auch nach mehr als einhundert Jahren ist die Suche nach einem universell einsetzbaren und robusten Modell für Turbulenz noch nicht abgeschlossen, jedoch existieren zahlreiche Modellvarianten, die für unterschiedliche Klassen und Konfigurationen von turbulenten Strömungsproblemen jeweils optimiert wurden. Dies setzt offensichtlich bei Anwendungsfällen eine große Sachkenntnis der entsprechenden Akteure voraus. Über die komplexen Fragen der Modellierung hinausgehend ist jedoch im Sinne der Minimierung der Problemlösungszeit von Simulationaufgaben heutzutage die Kombination von physikalisch-mathematischem Modell, einer diesem angepassten numerischen Methodik und entsprechend der einzusetzenden Rechnerarchitektur angepassten Algorithmik von großer Bedeutung. Dieses Wechselspiel erfordert die enge Zusammenarbeit von Spezialisten aus den jeweiligen Disziplinen, aber auch die Ausbildung von Generalisten, die zumindest ein gutes Übersichtswissen dieser Disziplinen besitzen. Ein solches Ziel wird beispielsweise in der universitären Ausbildung entsprechend fokussierter Master-Studiengänge im Bereich des Computational Engineering verfolgt.

Literatur

- [1] http://de.wikipedia.org/wiki/Panta_rhei
- [2] SCHÖNHERR, M., M. GEIER & M. KRAFCZYK 2011: 3D GPGPU LBM implementation on non-uniform grids. International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics.
- [3] TÖLKE, J. & M. KRAFCZYK 2008: ‘TeraFLOP computing on a desktop PC with GPUs for 3D CFD’, International Journal of Computational Fluid Dynamics, **22**:7, 443–456.
- [4] http://www.nvidia.de/object/cuda_home_new_de.html
- [5] Codex Atlanticus, 185v
- [6] Codex Atlanticus, f. 26v
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes_existence_and_smoothness
- [8] BOUSSINESQ, JOSEPH VALENTIN 1897: Théorie de l’écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes a grande section (vol.1), Gauthier-Villars.
- [9] SMAGORINSKY, JOSEPH 1963: “General Circulation Experiments with the Primitive Equations”. Monthly Weather Review **91**(3): 99–164.
- [10] FRÖHLICH, J. & D. VON TERZI 2008: Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows, Progress in Aerospace Sciences, Volume **44**, Issue 5, Pages 349–377, ISSN 0376-0421, <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.05.001>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042108000390>)
- [11] UPHOFF S. 2013: “Development and Validation of turbulence models for Lattice Boltzmann schemes“ Dissertation, TU Braunschweig.

Nachhaltigkeitsberichterstattung*

JOACHIM HENTZE

Brachvogelweg 4, D-30916 Isernhagen

Die Normalität des „Weiter-So“ stößt an ihre Grenzen. Es stellt sich für die Gesellschaft und damit auch für die Unternehmen die Frage, wie wir wirtschaftlichen Wohlstand zusammen mit sozialer Gerechtigkeit und dem Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen generieren können.

Mit diesem Beitrag wird das Ziel verfolgt, dem Leser einen Überblick und eine Orientierungshilfe zu führenden Standards der Nachhaltigkeitsberichterstattung zu geben.

1. Nachhaltigkeitsberichterstattung im Kontext des Nachhaltigkeitsmanagements

Ein auf Nachhaltigkeit ausgerichtetes Management ist durch eine hohe Verantwortung für Mitarbeiter, gesellschaftlich-soziales und ökologisches Umfeld sowie ein profitables Wachstum gekennzeichnet, ohne das Unternehmen in der gegenwärtigen Wirtschaftsordnung kaum bestehen können. Die globalen Herausforderungen wie Klimawandel und Ressourcenschonung, Achtung der Menschenrechte und gesellschaftliche Teilhabe sowie die zunehmenden Erwartungen der politischen und wirtschaftlichen Stakeholder, insbesondere der Kunden in Bezug auf Qualität der Produkte, Transparenz und Steuerungsqualität des Managements bilden anspruchsvolle Maßstäbe für das Nachhaltigkeitsmanagement eines Unternehmens. Nachhaltigkeitsmanagement umfasst auch das Beachten interner und externer Regeln und Gepflogenheiten, eine wertebasierten Unternehmensidentität und -kultur sowie das Vorhandensein einer bewussten Beschäftigung mit Fragen der Ethik und Moral bzw. eines Ethikmanagements.

Die Herausforderungen resultieren aus den Erwartungen der Gesellschaft, der Stakeholder und den jeweiligen Handlungsfeldern der Unternehmen, die dem Management potentielle Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Stakeholder erwarten im

* Es handelt sich um eine gekürzte und aktualisierte Version eines Vortrags, der am 12. April 2013 in der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten wurde. Inzwischen ist das Thema in folgender Monografie vertieft worden: Joachim Hentze und Björn Thies: „Stakeholder-Management und Nachhaltigkeits-Reporting“, Springer Gabler, Wiesbaden, 2014 (i.E.).

Rahmen der ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlich-sozialen Themen verantwortungsvolle Entscheidungen und Aktivitäten seitens des Managements. Für ein effizientes Nachhaltigkeitsmanagement sind Strukturen und organisatorische Regeln und Richtlinien erforderlich. Nachhaltigkeitsmanagement vollzieht sich in einem mehrstufigen Prozess mit folgenden Phasen: Planen, Implementieren, Überwachen und Kontrollieren, Prüfen und Berichten, Bewerten und Analysieren (siehe auch Abb. 1).

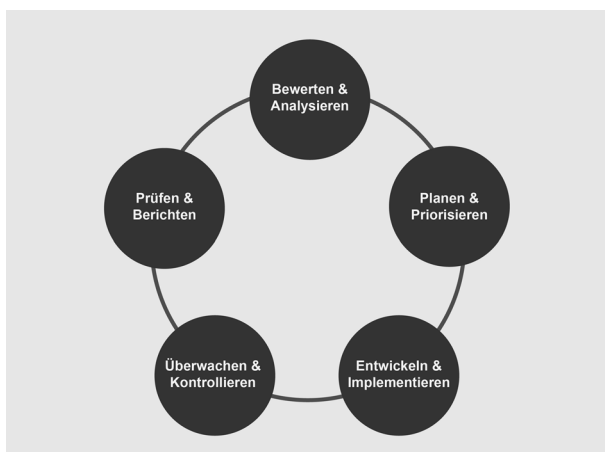


Abb. 1: Phasenmodell des Nachhaltigkeitsmanagements (E.ON AG, 2011: 19)

Die Nachhaltigkeitsberichterstattung stellt im Konzept des Nachhaltigkeitsmanagements eine Phase dar, die auch die betriebswirtschaftliche Prüfung einschließt. Die Berichterstattung vollzieht sich nach internen und externen Standards, die sehr vielfältig sein können.

Weit verbreitet ist die Dokumentation der Nachhaltigkeitsleistungen nach den zehn Prinzipien des Global Compact, den Richtlinien der Global Reporting Initiative (GRI), dem Deutschen Nachhaltigkeitskodex (DNK) und den EFFAS Prinzipien der European Federation of Financial Analyst Societies. Nachhaltigkeitsberichte werden national und international insbesondere nach den Prüfstandards ISAE 3000 (Assurance Engagement) und dem Standard AccountAbility (AA 1000) geprüft. Die Nachhaltigkeitsberichterstattung hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Gründe hierfür sind neben dem allgemein steigenden Interesse von Stakeholdern an der Umweltverträglichkeit unternehmerischen Handelns, die Veröffentlichung des Deutschen Nachhaltigkeitskodex (2011) und die Bekanntmachung des neuen Berichtsstandards G4 der Global Reporting Initiative

(2013). Darüber hinaus haben das Europäische Parlament und die Europäische Kommission sich 2012 für eine Berichtspflicht zu nicht finanziellen Kennzahlen ausgesprochen, der alle Unternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern nachkommen sollen. Zudem tragen zahlreiche Beratungsgesellschaften mit eigenen Vorschlägen und Publikationen zur Weiterentwicklung des Themas bei. Insbesondere größere börsennotierte Unternehmen präsentieren in der Regel jährlich einen Nachhaltigkeitsbericht mit einem Prüfbericht.

2. Nachhaltigkeitsberichterstattung als Kommunikationsinstrument

Die zentrale Aufgabe der Berichterstattung besteht darin, die Handlungen und Ergebnisse des Nachhaltigkeitsmanagements für die Unternehmensführung und die Stakeholder zu dokumentieren, um eine Grundlage zu schaffen, die zukünftige Entscheidungen und Handlungen nachhaltigen Wirtschaftens unterstützt. Die Berichterstattung ist ein Kommunikationsinstrument und soll dazu beitragen, den Dialog mit den Anspruchsgruppen zu fördern. Systematische Stakeholder-Dialoge sollen zu einem besseren gegenseitigen Verständnis und dem Aufbau von Vertrauen und Integrität beitragen. In Gesprächen mit Vertretern der Anspruchsgruppen werden Sichtweisen und Handlungsoptionen offengelegt und Herausforderungen nachhaltigen Wirtschaftens diskutiert, wodurch Risiken eher erkannt, Verbesserungsmöglichkeiten leichter gesehen sowie Trends besser erkannt werden sollen. Der Stakeholder-Dialog wird gleichzeitig genutzt, um über die Auswirkungen des eigenen Handelns auf Mensch und Umwelt Auskunft zu geben und Rechenschaft abzulegen.

Da sich die Rahmenbedingungen verändern, sind die Handlungsmaximen regelmäßig zu hinterfragen und ihre Wirksamkeit hinsichtlich der Zielerreichung zu überprüfen. Die Themen werden in Zusammenarbeit mit den Anspruchsgruppen nach ihrer Wesentlichkeit (Materialität) priorisiert. In der Praxis wird eine Vielzahl von Formaten zum Austausch mit den Stakeholdern eingesetzt. Die Ergebnisse werden vielfach in einer Materialitätsmatrix festgehalten (siehe Abb. 2). Mit ihrer Erarbeitung ermittelt das Unternehmen wesentliche Themen, die sowohl für die Stakeholder als auch das Unternehmen relevant sind. Aus der Matrix ist der aktuelle Handlungsbedarf zu ersehen.

3. Formate zur Erstellung von Nachhaltigkeitsberichten

3.1 UN Global Compact

Der Global Compact wurde 1999 vom damaligen UN-Generalsekretär Kofi Annan auf dem World Economic Forum in Davos vorgestellt und ein Jahr später

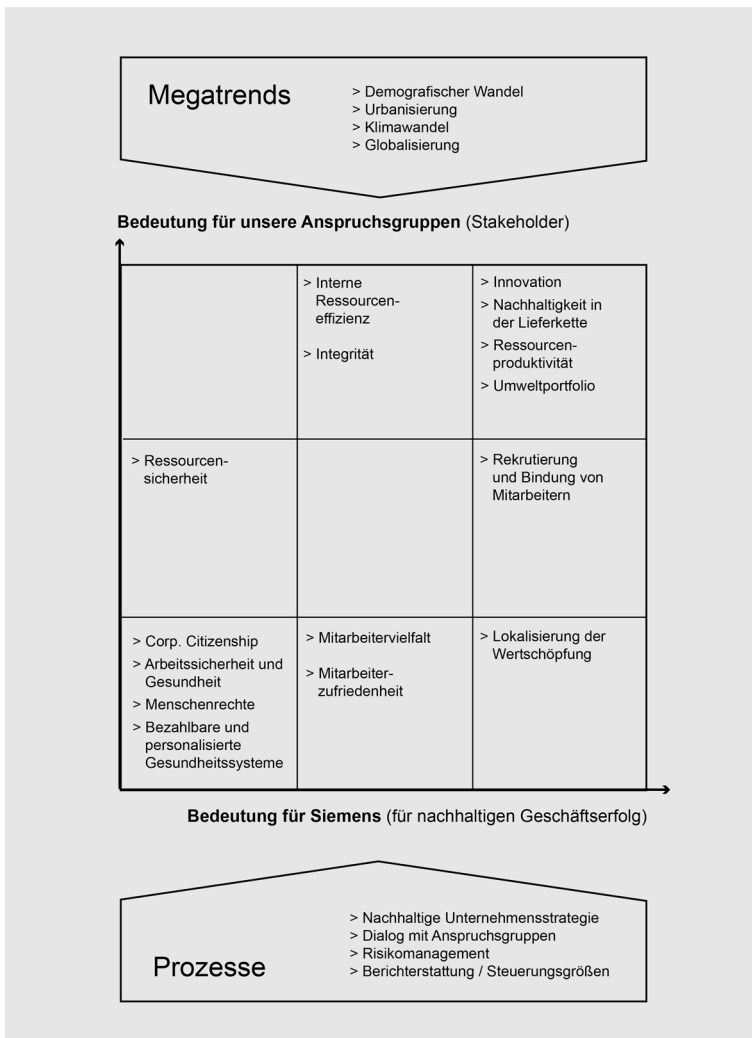


Abb. 2: Siemens Materialitätsmatrix 2013 (Siemens, 2013: 11)

in Kraft gesetzt. Er ist ein weltweiter Aufruf an Unternehmen, ihre Strategien und Aktivitäten an zehn anerkannten Prinzipien auszurichten, die die Bereiche Menschenrechte, Arbeitsnormen, Umweltschutz und Korruptionsbekämpfung abdecken und die allgemeinen Ziele der UN unterstützen (siehe Abb. 3).

Die zehn Prinzipien des Global Compact	
Menschenrechte	
Prinzip 1	Unternehmen sollen den Schutz der internationalen Menschenrechte innerhalb ihres Einflussbereichs unterstützen und achten und
Prinzip 2	sicherstellen, dass sie sich nicht an Menschenrechtsverletzungen mitschuldig machen.
Arbeitsnormen	
Prinzip 3	Unternehmen sollen die Vereinigungsfreiheit und die wirksame Anerkennung des Rechts auf Kollektivverhandlungen wahren sowie ferner für
Prinzip 4	die Beseitigung aller Formen der Zwangsarbeit,
Prinzip 5	die Abschaffung der Kinderarbeit und
Prinzip 6	die Beseitigung von Diskriminierung bei Anstellung und Beschäftigung eintreten.
Umweltschutz	
Prinzip 7	Unternehmen sollen im Umgang mit Umweltproblemen einen vorsorgenden Ansatz unterstützen,
Prinzip 8	Initiativen ergreifen, um ein größeres Verantwortungsbewusstsein für die Umwelt zu erzeugen, und
Prinzip 9	die Entwicklung und Verbreitung umweltfreundlicher Technologien fördern.
Korruptionsbekämpfung	
Prinzip 10	Unternehmen sollen gegen alle Arten der Korruption eintreten, einschließlich Erpressung und Bestechung.

Abb. 3: Die zehn Prinzipien des Global Compact (UN Global Compact, 2012a)

Der UN Global Compact ist eine freiwillige Plattform für den Stakeholderdialog und gegenseitiges Lernen. Ihm gehören heute über 10.000 teilnehmende Unternehmen aus über 130 Ländern an (UN Global Compact, 2012b). Er stellt damit die weltweit größte Bewegung gesellschaftlich engagierter Unternehmen dar (ebd.). Teilnehmer am Global Compact verpflichten sich, jährlich über ihren Fortschritt bei der Umsetzung der zehn Prinzipien zu berichten. Die Fortschrittsmitteilung (Communication on Progress, COP) ist als Mitteilung eines Unternehmens an seine Stakeholder zu verstehen. Eine vollständige COP beschreibt durchgeführte Maßnahmen und erzielte Ergebnisse.

3.2 Global Reporting Initiative (GRI, G4)

Bei den Reporting Guidelines der Global Reporting Initiative handelt es sich um den weltweit meistbeachteten Standard zur Nachhaltigkeitsberichterstattung, der

insbesondere von großen Unternehmen angewendet wird. Nachhaltigkeitsberichte der DAX 30 Unternehmen sind in der Regel an GRI-Richtlinien orientiert. GRI arbeitet eng mit dem UN Global Compact zusammen.

Der GRI-Berichtsrahmen umfasst eine detaillierte Anleitung für die Berichterstattung über ökonomische, ökologische und gesellschaftlich-soziale Leistungen von Unternehmen und anderen Organisationen. Im Mai 2013 wurden die neuen Berichtsrichtlinien G4 vorgestellt (GRI, 2013b; GRI, 2013a). Sie wurden in einem umfangreichen öffentlichen, internationalen Beratungsverfahren entwickelt und sollen einfacher zu handhaben sein als ihre Vorgänger.

Folgende Grundsätze gelten zur Bestimmung der Inhalte von Berichten: Einbeziehung von Stakeholdern, Nachhaltigkeitskontext, Wesentlichkeit, Vollständigkeit (GRI, 2013b: 16f.). Hinsichtlich der Berichtsqualität gelten die Prinzipien: Ausgewogenheit, Vergleichbarkeit, Genauigkeit, Aktualität, Klarheit und Verlässlichkeit (GRI, 2013b: 17). Zu folgenden sieben Bereichen muss dabei jedes Unternehmen berichten, das sich auf GRI beziehen will (GRI, 2013b: 20f):

- Strategie und Analyse
- Organisationsprofil
- ermittelte wesentliche Aspekte und Grenzen
- Einbindung von Stakeholdern
- Berichtsprofil
- Unternehmensführung
- Ethik und Integrität

Hierzu werden insgesamt 58 allgemeine Standardangaben (General Standard Disclosures) genannt, zu denen grundsätzlich alle Organisationen berichten können sollten. Die Leitlinien bieten nun zwei Optionen für die Erstellung des Nachhaltigkeitsberichts in Übereinstimmung (in accordance) mit dem G4 Standard an. Diese zwei Optionen sind *Kern (core)* und *Umfassend (comprehensive)*. Die erste Option enthält die wesentlichen Elemente eines Nachhaltigkeitsberichts. Die zweite Option baut auf der Kernoption auf und erfordert zusätzliche Standardangaben zur Strategie und Analyse, zur Unternehmensführung sowie zur Ethik und Integrität der Organisation. Darüber hinaus muss die Organisation ausführlicher über ihre Leistungen berichten. Unternehmen, die einen Bericht erstellen möchten, der dem einfacheren Anspruch (core) gerecht werden soll, müssen 34 Indikatoren bewerten und ggf. zu ihnen berichten. Unternehmen, die einen Bericht mit dem weitergehenden Anspruch (comprehensive) erstellen möchten, müssen alle 58 Indikatoren auf die Bedeutung für ihre Tätigkeit hin untersuchen und ggf. zu ihnen berichten (GRI, 2013b: 24 ff.).

Im Anschluss an die allgemeinen Standardangaben sind 92 spezifische Indikatoren hinsichtlich ihrer Relevanz für die Tätigkeiten des Unternehmens zu befragen und ggf. zu berücksichtigen. Sie sind in die drei Kategorien Wirtschaft, Umwelt und Soziales gegliedert (GRI, 2013b: 43 ff.).

Über die allgemeinen Berichtsleitlinien hinaus veröffentlicht die Global Reporting Initiative sogenannte sector supplements. Diese sollen von Unternehmen aus besonderen Bereichen (z.B. Finanzwirtschaft) berücksichtigt werden. Auch Sie umfassen allgemeine Indikatoren (General Standard Disclosures), zu denen berichtet werden muss sowie sektorspezifische Ergänzungen und Aspekte, die es in Abhängigkeit von ihrer Bedeutung zu berücksichtigen gilt.

3.3 Berichterstattung nach EFFAS Prinzipien

Die European Federation of Financial Analyst Societies (EFFAS) ist ein Zusammenschluss von Europäischen Analysten-Vereinigungen mit Sitz in Frankfurt/M. EFFAS vertritt knapp 30 Ländergesellschaften mit ca. 16.000 professionellen Finanzanalysten. Die deutsche Seite wird von der Deutschen Vereinigung für Finanzanalyse und Asset Management (DVFA) vertreten (Effas, 2010: S 3 ff.).

Die Effaskommission für ESG (Environment, Social and Governance) und DVFA haben im April 2010 die Version 3.0 der Key Performance Indicators (KPIs) als Standardregelwerk für die Nachhaltigkeitsberichterstattung herausgegeben (Effas, 2010). Der Leitfaden umfasst ca. 200 Seiten und enthält eine Einführung in das Konzept der Anwendung der KPIs zur Berichterstattung sowie eine Liste von KPIs für verschiedene Branchen. Es handelt sich um ca. 130 branchenübergreifende und -spezifische ESG-Kriterien.

In ESG 3.0 werden Grundlagen für die Integration von Umwelt, Soziales und Governance in der Unternehmensberichterstattung vorgeschlagen. Der ESG 3.0 formuliert Anforderungen für die Präsentation des ESG-Berichts, empfiehlt einen Leitfaden für die Präsentation und gibt die Struktur und die Minimalanforderungen für Angaben vor. KPIs des ESG-Konzepts sind für gewinnorientierte Unternehmen gedacht. Manche Indikatoren können nicht durch Zahlen ausgedrückt werden. In diesen Fällen sind Fragen kurz und präzise zu beantworten. Die Unternehmung sollte Daten im Zeitvergleich und im Kontext eines Benchmarks mit anderen Unternehmen präsentieren. Der Bericht sollte konsistent und plausibel sein, finanzielle Informationen sollten quantifiziert und hinreichend dokumentiert sein. Neben dem gesonderten ESG-Bericht in gedruckter Form oder als Onlineversion enthält auch der Geschäftsbericht ESG-Daten und -Informationen. Für die ESG-Angaben werden drei Stufen unterschieden, die unterschiedliche Reichweiten (Scope 1–3) der einzubeziehenden Faktoren betreffen (Effas, 2010: S. 15):

1. Entry Level (Scope I)
2. Midlevel (Scope II)
3. High Level (Scope III)

Der Entry Level enthält ein Minimum an KPI-Angaben. Midlevel und High Level unterscheiden sich in den Aussagen und den Details des Reports. Die KPIs sollen selbsterklärend sein. Die zusätzlichen Erklärungen sollen die ESG-Daten im Kontext betrachten.

3.4 Der Deutsche Nachhaltigkeitskodex (DNK)

Der Rat für Nachhaltige Entwicklung, ein von der Bundesregierung eingesetztes Expertengremium, hat im September 2011 seine Empfehlung zum Deutschen Nachhaltigkeitskodex der Öffentlichkeit vorgestellt. Den Unternehmen bleibt die freiwillige Anwendung des Kodex überlassen. Sie erklären, ob und inwieweit sie den Anforderungen des Deutschen Nachhaltigkeitskodex entsprechen (comply or explain). Eine Stärke des DNK ist sein vergleichsweise geringer Umfang und seine entsprechend einfache Anwendbarkeit. Hierüber ermöglicht er insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen einen Einstieg in das Nachhaltigkeitsmanagement und die Nachhaltigkeitsberichterstattung. Der Kodex gliedert sich in vier Themenbereiche und 20 Berichtsfelder (siehe Abb. 4).

Branchenspezifische Anpassungen und Ergänzungen des DNK sind möglich und können durch das jeweilige Unternehmen vorgenommen werden. Der Deutsche Nachhaltigkeitskodex wird in der Broschüre des Rats für Nachhaltige Entwicklung um Anwendungshinweise und Kommentare ergänzt.

4. Schlussbemerkung

Transparenz und Glaubwürdigkeit sind entscheidende Parameter der Nachhaltigkeitsberichterstattung, die insbesondere mithilfe von Stakeholder-Dialogen erreicht und gesichert werden sollen. Bislang ist das Reporting freiwillig, aber mächtige Stakeholder wie Banken und NGOs und auch politische Institutionen drängen zunehmend intensiv auf eine anspruchsvolle Nachhaltigkeitsberichterstattung insbesondere von größeren Unternehmen.

Die Entwicklung der standardisierten Nachhaltigkeitsberichterstattung ist von einer zunehmenden Dynamik geprägt. Während die Datenbank der Global Reporting Initiative für das Jahr 2002 nur 148 registrierte Berichte umfasst, sind es für 2012 bereits 3.650 Berichte (GRI, 2013c). Wie regelmäßige Untersuchungen von IÖW/future zeigen, ist eine professionelle Nachhaltigkeitsberichterstattung heute auch bei kleinen und mittleren Unternehmen bereits verbreitet (IÖW/future,

Gliederung Deutscher Nachhaltigkeitskodex:

Strategie

- Strategische Analyse, Strategie und Ziele (1-4)

Prozessmanagement

- Regeln und Prozesse (5-7)
- Anreizsysteme (8)
- Stakeholdermanagement (9)
- Innovations- und Produktmanagement (10)

Umwelt

- Inanspruchnahme von natürlichen Ressourcen (11-13)

Gesellschaft

- Arbeitnehmerrechte und Diversity (14-16)
- Menschenrechte (17)
- Gemeinwesen (18)
- Politische Einflussnahme (19)
- Korruption (20)

Abb. 4: Gliederung des Deutschen Nachhaltigkeitskodex (DNK, 2011: 6–15)

2012). Mit der Einführung des Deutschen Nachhaltigkeitskodexes (DNK) und den neuen Richtlinien der GRI liegen heute Standards vor, die einen Einstieg in die Berichterstattung leicht möglich machen. Eine Aktualisierung des DNK mit Anpassungen an die die G4 Richtlinien ist für 2014 zu erwarten.

Literaturverzeichnis

DNK (2011): Der Deutsche Nachhaltigkeitskodex (DNK). Rat für Nachhaltige Entwicklung: Berlin

E.ON AG (2011): E.ON CR-Bericht 2010. E.ON AG. http://www.eon.com/content/dam/eon-com/de/downloads/c/CR_Bericht_E.ON_AG_2010_.pdf (Stand: 31.01.2013)

Effas (2010): KPIs for ESG. A Guideline for the Integration of ESG into Financial Analysis and Corporate Valuation. Version 3.0 (Hrsg.: EFFAS und DVFA). http://www.effas-esg.com/wp-content/uploads/2011/07/KPIs_for_ESG_3_0_Final.pdf (Stand: 01.02.2013)

GRI (2013a): G4 Sustainability Reporting Guidelines. Implementation Manual. Global Reporting Initiative. <https://www.globalreporting.org/resource/library/GRIG4-Part2-Implementation-Manual.pdf> (Stand: 25.05.2013)

GRI (2013b): G4 Sustainability Reporting Guidelines. Reporting Principles and Standard Disclosures. Global Reporting Initiative. URL: <https://www.globalreporting.org/resource/library/GRIG4-Part1-Reporting-Principles-and-Standard-Disclosures.pdf> (Stand: 25.05.2013)

GRI (2013c): Sustainability Disclosure Database. URL: <http://database.globalreporting.org/> (Stand: 20.01.2014)

IÖW/future (2012): Ranking der Nachhaltigkeitsberichte deutscher KMU 2011. Ergebnisse und Trends. http://www.ranking-nachhaltigkeitsberichte.de/data/ranking/user_upload/pdf/IOEW-future-Ranking_2011_KMU_Ergebnisbericht.pdf (Stand: 31.01.2014)

Siemens (2013): Nachhaltigkeitsbericht 2012. Siemens AG. <http://www.siemens.com/sustainability/pool/de/nachhaltigkeitsreporting/siemens-nb-strategie.pdf> (Stand: 05.02.2014)

UN Global Compact (2012a): Die Zehn Prinzipien. http://www.unglobalcompact.org/languages/german/die_zehn_prinzipien.html (Stand: 05.02.12013)

UN Global Compact (2012b): Overview of the UN Global Compact. <http://www.unglobalcompact.org/AboutTheGC/index.html> (Stand: 01.02.2013)

Computergestützte Modellierung in der kardiovaskulären Medizintechnik*

TIM A.S. KAUFMANN, ULRICH STEINSEIFER, THOMAS SCHMITZ-RODE

Institut für Angewandte Medizintechnik, Helmholtz Institut,
RWTH Aachen und Universitätsklinikum Aachen
Pauwelsstrasse 20, D-52074 Aachen

Einleitung

Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems sind die häufigste Todesursache in entwickelten Ländern. Die stetig wachsende Zahl an Patienten, sowie der Kostendruck in modernen Gesundheitssystemen, stellen unsere Gesellschaft daher vor immense Herausforderungen. In Anbetracht des demographischen Wandels ist außerdem anzunehmen, dass die Kosten und die Belastungen für medizinisches Personal in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen werden. Aus diesem Grund ist es zwingend erforderlich, wirksame neue Therapiemöglichkeiten zur Behandlung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen kosteneffizient zu entwickeln. Um dies zu erreichen, muss eine Brücke zwischen klinischer Expertise und neuen Werkzeugen der Forschung geschlagen werden.

Die computergestützte Modellierung ist ein Forschungsfeld, das in den letzten Jahren durch die stetigen Verbesserungen der Rechenkapazitäten mehr und mehr in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt ist. In der Medizin unterliegen diese Modelle hohen Anforderungen, da neben der Komplexität der zugrunde liegenden Mechanismen auch und insbesondere die Sicherheit der Patienten berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund werden Computermodelle in der Medizin zumeist lediglich im Bereich der präklinischen Forschung angewandt.

Am Institut für Angewandte Medizintechnik (AME) der RWTH Aachen wird an der Entwicklung von herzunterstützenden Systemen, künstlichen Lungen und neuartigen künstlichen Herzklappen gearbeitet. Ein weiteres Forschungsfeld ist die Untersuchung der Interaktion solcher künstlicher Organe mit dem Empfänger-Organismus. Die computergestützte Modellierung unterstützt dabei in allen Bereichen die klassische Forschung. Die Hauptziele dieses Ansatzes bestehen darin, dass bereits sehr früh in Projekten mit einer Design-Optimierung begonnen werden kann, wodurch Prototypen und somit Entwicklungszeit und -kosten

* Der Vortrag wurde am 26.04.2013 beim Carl-Friedrich-Gauß-Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

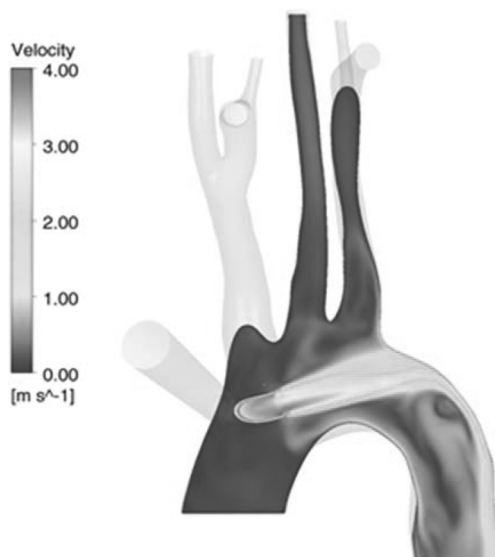


Abb. 1. Simulierter Blutfluss im Aortenbogen beim Einsatz von Herz-Lungen-Maschinen.

gespart werden. Außerdem erlaubt eine numerische Analyse die Untersuchung einer Vielzahl von Parametern, die in experimentellen oder klinischen Studien oftmals nur sehr aufwändig untersucht werden können. Numerisch können dadurch Korrelationen und Kausalitäten zwischen einzelnen Parametern bestimmt werden. Hierdurch bietet die computergestützte Modellierung zudem ein Werkzeug, um das Verständnis einiger grundlegender Mechanismen zu verbessern. Im Folgenden werden die Möglichkeiten computergestützter Modellierung für die Bereiche Herzunterstützung und Herzersatz, Herzklappen, Lungenunterstützung und Mensch-Maschine-Interaktion diskutiert.

Herzunterstützung und Herzersatz

Bei der technisch-mechanischen Behandlung der Herzinsuffizienz wird zwischen zwei Ansätzen unterschieden, der Herzunterstützung und dem Herzersatz. Bei Ersterem wird das Herz des Patienten durch technische Geräte wie Blutpumpen unterstützt, wohingegen es bei einem Herzersatz komplett entnommen und durch ein technisches System ersetzt wird.

Für Patienten, die eine Herzunterstützung benötigen, haben sich in den vergangenen Jahren sogenannte Rotationsblutpumpen durchgesetzt, bei denen ein Schaufelrad das Blut des Patienten kontinuierlich fördert. Diese Pumpen werden

zunächst analytisch ausgelegt und dann mittels Computersimulationen optimiert. Hierbei wird die hydraulische Effizienz berechnet, die besagt, welchen Druckaufbau eine Pumpe bei welchem Volumenfluss leistet.

Diese Berechnungen werden teilweise parametrisiert durchgeführt, sodass eine Design-Optimierung am Computer vor der Herstellung von Labormustern erfolgt. Ein weiterer Schwerpunkt der Entwicklung liegt auf der Vermeidung von strömungsinduzierter Blutschädigung, also der Zerstörung von roten Blutkörperchen (Erythrozyten). Diese Schädigung findet statt, wenn Erythrozyten eine gewisse Zeit einer bestimmten Scherbelastung ausgesetzt sind, wie sich an Experimenten in einer Couette-Strömung zeigen lässt. Über diese Korrelation werden Strömungssimulationen verwendet, um mittels simulierter Partikelbahnen einzelner Erythrozyten die Scherbelastung über die entsprechende Expositionszeit zu integrieren. Über die Mittelung mehrerer Tausend Erythrozyten lässt sich dann ein Maß für die strömungsinduzierte Hämolyse berechnen, wodurch das Blutpumpen-Design wiederum am Computer angepasst werden kann. Zudem kann mittels Magnetfeld- und Wärmetransport-Simulationen bestimmt werden, wie die Wärme, die sich in den Antrieben dieser Pumpen bildet, vom blutführenden System abtransportiert wird. Diese Methode wird insbesondere zur Vermeidung von Gebieten hoher Wärme eingesetzt, an denen es zur wärmeinduzierten Zerstörung von Blutbestandteilen kommen könnte.

Eine Alternative zur Herzunterstützung ist der Herzersatz, der insbesondere dann eine Option darstellt, wenn das native Herz schwer erkrankt oder entzündet ist, sodass eine Herzunterstützung keine ausreichende Behandlungsmethode darstellt. Der Goldstandard auf diesem Gebiet ist die Herztransplantation. Durch die Knappheit an Organ Spendern sind die Wartezeiten jedoch oft sehr lang, sodass wiederum technische Systeme als Überbrückung oder sogar als Dauer-Therapie herangezogen werden. Am AME wird daher an der Entwicklung eines voll implantierbaren Kunsthertzens gearbeitet, bei dem ein Linearmotor zwei Membranen wechselseitig antreibt und somit die pulsatile Funktion des nativen Herzens nachbildet. Hierbei werden numerische Modelle (Fluid-Struktur-Interaktion) verwendet, um die Strömung innerhalb der beiden Ventrikel (Pumpkammern) zu simulieren, sowie die Verformung der Membran zu analysieren. Des Weiteren wird über mehrphasige Blutmodelle berechnet, wie effizient die Ventrikel pro Zyklus ausgewaschen werden, wodurch das Risiko zur Bildung von Blutthromben reduziert werden kann.

Herzklappen

Bei der Entwicklung von neuartigen Herzklappen spielen Computersimulationen eine tragende Rolle. Neuartige Herzklappen sind faltbar und werden über einen Katheter appliziert. Hierbei lässt sich beispielsweise der Faltungs-Vorgang

(„Crimping“) simulieren, um bereits während der Entwicklung Schwachstellen im Material zu identifizieren. Ein ähnliches Vorgehen hat sich für die Entwicklung von Stents etabliert. Außerdem wird die Blutströmung um die Herzklappensegel mittels Fluid-Struktur-Interaktion am Computer berechnet, um über Rezirkulationsgebiete und solche hoher Scherspannungen das Risiko zur Thrombenbildung zu bestimmen.

Lungenunterstützung

Ein Forschungsschwerpunkt am AME ist die Entwicklung von künstlichen Lungen, sogenannten Oxygenatoren. Bei modernen Membranoxygenatoren werden gasfördernde semipermeable Fasern von Blut umspült. Über ein Konzentrationsgefälle geht Sauerstoff von der Gasphase in die Fluidphase über, während Kohlendioxid vom Blut in die Gasphase übergeht. Somit erfüllen Oxygenatoren die Hauptfunktion der menschlichen Lunge.

Mittels Strömungssimulationen wird hierbei berechnet, ob sich das Blut gleichmäßig in den Faserbündeln verteilt oder ob es zu Rezirkulationsgebieten kommt. Eine Herausforderung stellt dabei die Modellierung des Faserbündels dar. Vereinfacht kann dieses über ein poröses Medium mit isotroper oder anisotroper Porosität dargestellt werden. Genauere Ergebnisse liefert die direkte Modellierung der mikroskopischen Faserstruktur, die jedoch einen hohen Rechenaufwand erfordert. Hierdurch lassen sich allerdings neuartige Modelle zum diffusiven Gasaustausch entwickeln und validieren. Die Erkenntnisse dienen der Gestaltung von Oxygenatoren mit höherer Effizienz, wodurch beispielsweise das Füllvolumen und die Baugröße reduziert werden kann. So lässt sich auch die Entzündungsantwort des Körpers auf die körperfremde Oberfläche im Blutkontakt reduzieren.

Mensch-Maschine-Interaktion

Allen oben angeführten Systemen ist gemein, dass sie über eine Schnittstelle, zumeist Kanülen oder textiles Graftmaterial, mit dem menschlichen Körper bzw. Blutkreislauf verbunden werden. Die Analyse dieser Schnittstellen, sowie des Einflusses der jeweiligen künstlichen Organe auf den Empfänger-Organismus mit seiner meist eingeschränkten Funktion, ist ein aktuelles Forschungsfeld in der Biomedizinischen Technik.

Anhand von klinischer Bildgebung wie MRT oder CT werden zunächst 3D-Modelle des menschlichen Kreislaufsystems von individuellen Patienten am Computer erstellt. Diese können nach Bedarf virtuell manipuliert werden, indem beispielsweise die Kanüle einer Herz-Lungen-Maschine oder der Ausflussgraft eines Herzunterstützungssystems per Computer „angenähert“ werden. Anschließend

wird die Strömungsverteilung im Gefäßsystem simuliert. Mit diesem Ansatz lässt sich unter anderem berechnen, ob die zerebrale Perfusion, also die Durchblutung des Gehirns, während des Einsatzes von technischen Geräten zur extrakorporalen Blutführung ausreichend ist. Dabei müssen diverse körpereigene Regelungsmechanismen wie die zerebrale Autoregulation berücksichtigt und über mathematische Modellierung in die Computersimulationen implementiert werden.

Diskussion

Durch die hohen Anforderungen an die obigen Simulationen hinsichtlich Komplexität, insbesondere aber Patientensicherheit, ist es zwingend erforderlich, alle am Computer durchgeführten Arbeiten in Experimenten zu validieren. Dies erfolgt in der Regel nicht während jedes Iterationsschrittes, sondern wird lediglich einmal zu Beginn für das Modell als solches, sowie für das finale Labormuster durchgeführt. Die Methoden der Validierung reichen dabei von einfachen Druck- oder Flussmessungen bei Herzklappen bis hin zur Particle-Image-Velocimetry (PIV), einer optischen Methode zur Strömungssichtbarmachung, die zur Validierung der Flussbilder im Herz-Kreislauf-System verwendet werden. Für Blutpumpen und Regelungsalgorithmen werden künstliche Kreisläufe, sogenannte Mock-Circulation-Loops, zur Validierung herangezogen. Der Gasaustausch in Oxygenatoren, sowie die Blutschädigung und Thrombenbildung in blutführenden Systemen, können wiederum in Blutversuchen im Labor nachgestellt werden.

Die kosteneffiziente Entwicklung neuartiger Therapiemethoden zur Behandlung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen ist eine der größten Herausforderungen für die medizinische Versorgung. Computergestützte Modellierungen bieten eine hervorragende Möglichkeit, in Kombination mit klassischen Werkzeugen der Forschung und klinischer Expertise diesen Herausforderungen zu begegnen. Für zukünftige Entwicklungen sollte dabei der Bezug zum Patienten mit seiner individuellen Anatomie und Pathologie im Vordergrund stehen, sodass bereits während der Entwicklung technischer Geräte für die Medizin deren Funktion und Wechselwirkung mit dem humanen Organismus berücksichtigt werden können.

Dynamics of the aortic root functional unit using Direct Numerical Simulation*

R. VERZICCO^{1,2} & M.D. DE TULLIO³

¹DII, Università di Roma "Tor Vergata", Roma, Italy

²PoF and MESA+, University of Twente, Enschede, The Netherlands

³DMMM, Politecnico di Bari, Bari, Italy

Abstract

The dynamics of the functional unit aortic valve/aortic root/coronary arteries/ascending aorta is very complex owing to the interaction of several mechanisms that interfere each other; this makes in vivo and in vitro analyses very expensive and numerical simulations a desirable option.

In this paper we describe an integrated tool that has been developed over the last decade capable of performing high-fidelity simulations which include the fluid/structure interaction, the deformability of the aortic wall and several other relevant features of the problem.

Some representative results are described in order to show the capabilities of the method.

1. Introduction

The replacement or re-modeling of heart valves, coronary arteries and aorta tracts is a relatively safe clinical practice, adopted whenever the actual organ cannot operate properly. Since the first successful heart valve replacement almost five decades ago, more than fifty valve designs have been developed and many others are being evaluated. Similarly, prosthetic aortic roots, biological and artificial bypass ducts and surgical procedures are continuously developed and tested (Sarsam & Yacoub, 1993; David & Feindel, 1992; Yacoub, 1996; David et al., 2001; Cochran et al., 1995; Bentall & De Bono, 1968; Karck et al., 2004; De Paulis et al., 2004; Weltert et al., 2009). The evaluation procedures include clinical trials, laboratory experiments (often called in vitro experiments) and more recently also numerical simulations.

Although many progresses have been obtained by studying the dynamics of single parts, it has been realized that they are elements of a more complex set-up and

* Der Vortrag wurde am 26.04.2013 anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

considering the complete system would be desirable in order to obtain further improvements.

More in detail, among the four heart chambers, the left ventricle is the strongest and it ejects the blood into the aorta that, in turn, feeds the systemic circulation. The aortic valve is located just downstream of the left ventricle and before the aorta whose initial tract, the aortic root, shows a peculiar geometry. It is characterized by three sinuses (sinuses of Valsalva) and, from two of them, the coronary arteries originate. These small arteries have a great clinical relevance because they supply oxygenated blood to the myocardial muscle itself (Nichols & O'Rourke, 1990; Zamir, 2005). Beyond the aortic root there is the ascending aorta whose walls store tension under the effect of the blood pressure, ejected during the systolic phase, and gradually release it during the diastolic phase thus assuring a smooth flow. The operation of such a complex set requires the coordinated interaction of different systems and in fact the former is referred to as 'functional unit' that should be analyzed as a whole rather than split into separate components.

The development of a computational model for the complete system is therefore motivated by physical but also medical and economic concerns as well as efficiency (Borazjani et al., 2007; Dasi et al., 2007; Nobili et al., 2008; de Tullio et al., 2009; Sotiropoulos & Borazjani, 2009). Sufficiently accurate computational models, in fact, would serve as inexpensive tools for scientific and medical research that, combined with medical imaging and other cardiovascular diagnostic techniques, would provide fundamental information for the improvement of the patients care.

Despite the progress in numerical methods and the forever increasing power of modern computers, however, the problem is still very challenging since it is composed by different problems each of them tough in its own. The aortic valve, in fact, operates under the forces exerted by the flow while the latter, in turn, depends on the instantaneous geometrical configuration of the domain; this is a fluid/structure interaction problem that requires the coupled solution of the structure and flow dynamics. The flow is unsteady (pulsatile) and transitional thus requiring the accumulation of tens of flow cycles in order to compute reliable phase averages but, at the same time, the computation must be advanced with time steps small enough to capture the dynamics of the smallest turbulence structures. Equally problematic is the disparity of spatial flow scales that requires to account for large structures with a scale comparable to the valve orifice (27 mm) down to the Kolmogorov scale ($\approx 30 \mu\text{m}$); this requires a very fine spatial resolution over a computational domain big enough to accommodate few of the largest scales. In addition, the above dynamics must be computed in a very complex geometry with parts in relative motion and deforming boundaries.

In this paper we describe an attempt to model the complete functional-unit with a high-fidelity numerical model that, while accounting for all the most relevant

features of the problem, keeps the computational cost of the simulation at a reasonable level so to allow reliable numerical simulations without resorting to the large scale supercomputers.

In the next section we describe the main features of the model while the section of the Results illustrates some of the main achievements.

2. The problem

2.1 The equations

The model problem is sketched in figure 1 and it consists of an initial tract of a rigid pipe (mimicking the aorto-ventricular junction) where a mechanical bileaflet valve is mounted. Downstream of the valve there is the deformable aortic root from which the coronary arteries, also deformable, originate. After the aortic root there is the initial part of the ascending aorta that is modeled as a deformable cylindrical pipe.

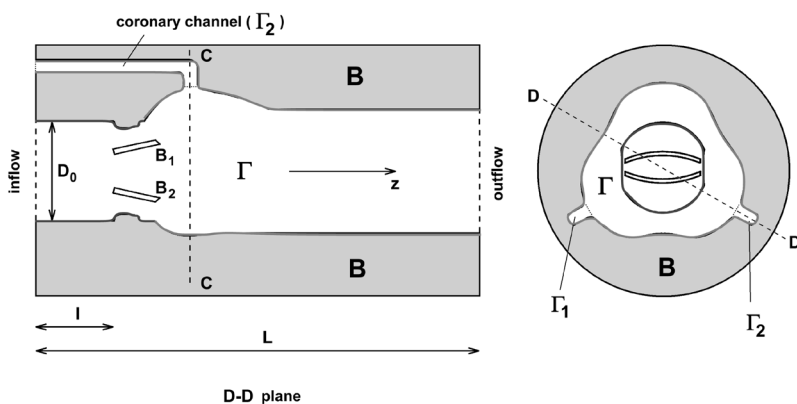


Fig. 1: Sketch of valve/root arrangement and computational domain ($L = 5D_0$; $l = D_0$)

In the time-dependent fluid domain $\Gamma + \Gamma_1 + \Gamma_2$ the Navier-Stokes equations for an incompressible viscous fluid are solved:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) &= -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} + \mathbf{f}', \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \quad \text{on } \Gamma + \Gamma_1 + \Gamma_2 \end{aligned} \quad (1)$$

where \mathbf{u} is the velocity vector, p is the pressure, \mathbf{f} is the direct forcing of the immersed boundary method (Fadlun et al., 2000), \mathbf{f}' is the forcing term for the

coronary arteries (de Tullio et al., 2011b), both later specified, and Re is the Reynolds number. The viscous stress tensor is defined through $\boldsymbol{\tau} = 2\rho\nu(|\mathbf{E}|)\mathbf{E}$ and the kinematic viscosity of the fluid can be either constant $\nu(|\mathbf{E}|) = \nu_0$ or a function of the rate-of-strain tensor modulus $|\mathbf{E}|$: In the first case the fluid is Newtonian, in the second is non-Newtonian.

Among the various possibilities we have adopted for the blood the shear-thinning model of Carreau that reads

$$\nu(|\mathbf{E}|) = \nu_\infty + (\nu_0 - \nu_\infty)[1 + (\lambda |\mathbf{E}|)^2]^{(n-1)/2} \quad (2)$$

where and both λ and n are hematocrit dependent parameters. We have chosen the parameters for an adult healthy male with an hematocrit of 40% that yield for $\nu_\infty \simeq 3.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ high shear rates and $\nu_0 \simeq 4.3\nu_\infty$ for vanishing shear rates.

The two leaflets, B_1 and B_2 can rotate about their own pivots and their angular displacements θ_i are governed by the following equations:

$$I_i \frac{d^2\theta_i}{dt^2} = T_i, \quad \text{for } B_i \quad \text{with } i = 1, 2, \quad (3)$$

where I_i are the dimensionless moment of inertia about the pivots and T_i are the tilting torques about the pivots resulting from the viscous stress tensor $\boldsymbol{\tau}$ and the pressure p integrated over the leaflets surfaces S_i . Their specific expressions are

$$T_i = \int_{S_i} [(\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} - p\mathbf{n}) \times \mathbf{r}] \cdot \hat{\mathbf{x}} dS, \quad (4)$$

with \mathbf{n} the outer normal to the surface S_i of the i -th leaflet, \mathbf{r} the vector given by the distance from the pivot axis to the surface element dS and $\hat{\mathbf{x}}$ the unit vector aligned with the pivot axis.

The deformable structures are governed by the Navier equation:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s = \rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{x}_s}{\partial t^2}, \quad (5)$$

where $\boldsymbol{\sigma}_s$ is the stress tensor, ρ_s the density and \mathbf{x}_s the displacement of the solid. The constitutive and compatibility relations are:

$$\boldsymbol{\sigma}_s = \mathbf{C}\mathbf{E}_s, \quad \text{with} \quad \mathbf{E}_s = \frac{1}{2}[\nabla \mathbf{x}_s + (\nabla \mathbf{x}_s)^T + (\nabla \mathbf{x}_s)^T \nabla \mathbf{x}_s], \quad (6)$$

being \mathbf{C} the elasticity tensor and \mathbf{E}_s the strain tensor (de Tullio et al., 2011b).

The equations for the fluid are discretized in space using second-order-accurate central differences in conservative form. The large-banded matrix associated with the elliptic equation is reduced to a penta-diagonal matrix using trigonometric expansions (FFT's) in the azimuthal direction and the resulting Helmholtz equations are then inverted using the FISHPACK package (Swartzrauber, 1974). A third order Runge-Kutta scheme is used to advance the equations in time. All the simulations have been run with a fixed Courant number $CFL = 0.25$ thus having a variable time step Δt that is adjusted accordingly. Small time steps occur during opening and closing of the leaflets, thus allowing an accurate simulation of these phases, while larger time steps typically occur after valve closure, with a mean flow essentially zero and the leaflets still. More details on the Navier-Stokes solver are given in Verzicco & Orlandi (1996), and Fadlun et al. (2000). The immersed boundary technique used in this work is the same as that used in a previous work (de Tullio et al., 2009), based on that proposed by Fadlun et al. (2000), Iaccarino & Verzicco (2003) and Cristallo & Verzicco (2006).

2.2 Fluid/structure interaction

As mentioned previously, in a fluid/structure interaction problem the flow is determined by the structure dynamics that, in turn, depends on the fluid dynamic loads. It must be therefore decided if the fluid problem is solved first and then the structure is adjusted or if both problems must be solved together. The first approach is referred to as loose coupling and it can be used either when the structure undergoes small displacements or when the added mass effects are negligible. On the other hand, the coupled solution of the two systems is called strong coupling and, although computationally expensive, is more robust and allows the integration of virtually any fluid-structure interaction problem.

A strong coupling scheme is employed for the solution of the system (1)–(3) since the leaflet of the mechanical valve undergo very large rotations ($\approx 60^\circ$) and the added mass effects largely overcome the inertia of the leaflets. A Hamming's 4th-order predictor-corrector method as described in Yang et al. (2008) is used to integrate equations (3) through an iterative scheme until convergence is achieved. In particular, equations (3) are expanded into a system of first order ordinary differential equations in the variables $\theta_l, \dot{\theta}_l$ with the generalized loads L_l on the right hand side. The fluid and structural solvers are then coupled through an iterative scheme and, for each time step, the number of iterations l is determined by the condition $ei = |\dot{\theta}_l^l - \dot{\theta}_l^{l-1}| < \varepsilon$. In all our computations a tolerance of $\varepsilon = 10^{-4}$ was used and the number of iterations required for convergence at each time step varied from 1 to 4, depending on the phase of the dynamics; convergence is typically more difficult during the opening and closing phases when the leaflets rotate very rapidly while the criterion is satisfied already at the first iteration when the leaflets remain still or move slowly. In order to avoid numerical instabilities in the fluid-

structure interaction algorithm induced by the added mass effect due to the very low moment of inertia of the valve leaflets (Borazjani et al., 2007), we employed an under-relaxation of the generalized loads according to $L_i = \gamma L_i^l + (1-\gamma)L_i^{l-1}$ with $\gamma = 0.9$, l the actual iteration level and $l-1$ the previous one. Further details on the method and several checks of the numerics can be found in de Tullio et al. (2009).

Equations (5)–(6) are instead solved explicitly in time for the aortic root, the ascending aorta and coronary arteries. These structures, in fact, undergo only small displacements and therefore can be integrated using a loose coupling approach with the fluid. In this context the equations are advanced at the end of the time step with the local hydrodynamic loads on the structures and computed from the distributions of p and τ obtained from equations (1); once the structure displacement \mathbf{x}_s is obtained from (5)–(6) its velocity \mathbf{u}_s can be computed and used as fluid boundary condition for the successive time step.

2.3 Immersed Boundary forcings

The forcing \mathbf{f} in equation (1) is needed by the IB method in order to impose a velocity boundary condition over a surface that does not conform to coordinate lines. The great advantage of this approach is that it avoids the need of body-fitted meshes that, on geometrically complex and deforming geometries would require computationally demanding procedures. The actual need for an explicit computation of \mathbf{f} depends on the particular IB technique, nevertheless every IB method eventually needs a reconstruction of the solution at the immersed surface. In fact, consider figure 2 where the shaded surface is the immersed boundary; it is immediately evident that while the boundary condition must be imposed over the surface, the flow unknowns are located somewhere in the computational cell and their position does not coincide with that of the surface; this is true for colocated methods as well as for staggered methods in which every flow variable is discretized in a different position. Simple mono- two- and full three-dimensional reconstruction schemes have been proposed (Fadlun et al. 2000, Gilmanov, Sotiropoulos & Balaras 2003, Tseng & Ferziger 2003, Kim et al. 2001) with different degrees of precision and efficiency although all of them yielding a second-order accuracy.

One general procedure consists of a preliminary tagging of the computational cells which classifies the nodes into external, internal and interface points. The tagging can be performed by a ray-tracing algorithm (O'Rourke, 1998) as discussed in Iaccarino & Verzicco (2003) which is a standard in computer graphics. From each interface node (point A in figure 2) the normal to the immersed surface is drawn and the intersection W is computed. A tetrahedron is then constructed with A and the three closest external nodes (B , C and D) such that the point W is contained inside the tetrahedron. Every velocity component u_i (the same procedure could be used for other flow variables as density, temperature, scalar concentration, etc.)

is then computed in A in such a way that the same variable assumes the values in B , C and D computed from the governing equations without any forcing and the prescribed boundary condition in W . Within a linear reconstruction assumes the form:

$$u_i = ax + by + cz + d \quad (7)$$

with a , b , c and d determined by the conditions $u_i = (u_i)_B$, $(u_i)_C$, $(u_i)_D$ and $(u_i)_W$, respectively, at the points B , C , D and W . Once the coefficients a , b , c and d are known from the above conditions the value of u_i in A is simply given by $(u_i)_A = ax_A + by_A + cz_A + d$. If, instead of Dirichlet conditions, Neumann boundary conditions ($\partial u_i / \partial n = \Phi_W$) are to be applied the wall condition $u_i = (u_i)_W$ is replaced by $\nabla u_i \cdot \mathbf{n} = \partial u_i / \partial x a + \partial u_i / \partial y b + \partial u_i / \partial z c = a\alpha + b\beta + c\gamma = \Phi_W$, where α , β and γ are the components of the normal \mathbf{n} in W .

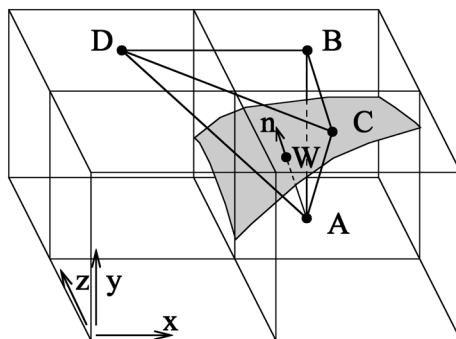


Fig. 2: Sketch of one possible interpolation scheme for the velocity reconstruction at the immersed boundary.

With the velocity vector \mathbf{u}_A at hand, the forcing \mathbf{f} for equation (1) is computed from its time-discrete version $(\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n)/\Delta t = \text{RHS}^{n+1/2} + \mathbf{f}^{n+1/2}$ through

$$\mathbf{f}^{n+1/2} = \frac{\mathbf{u}_A - \mathbf{u}^n}{\Delta t} - \text{RHS}^{n+1/2}, \quad (8)$$

which ensures $\mathbf{u}^{n+1} \equiv \mathbf{u}_A$ at the point A .

2.4 Modeling coronary-entry-flow

The ultimate function of the coronary system is to deliver blood to the cardiac tissue, that is alternately contracting and relaxing. During systole, the contrac-

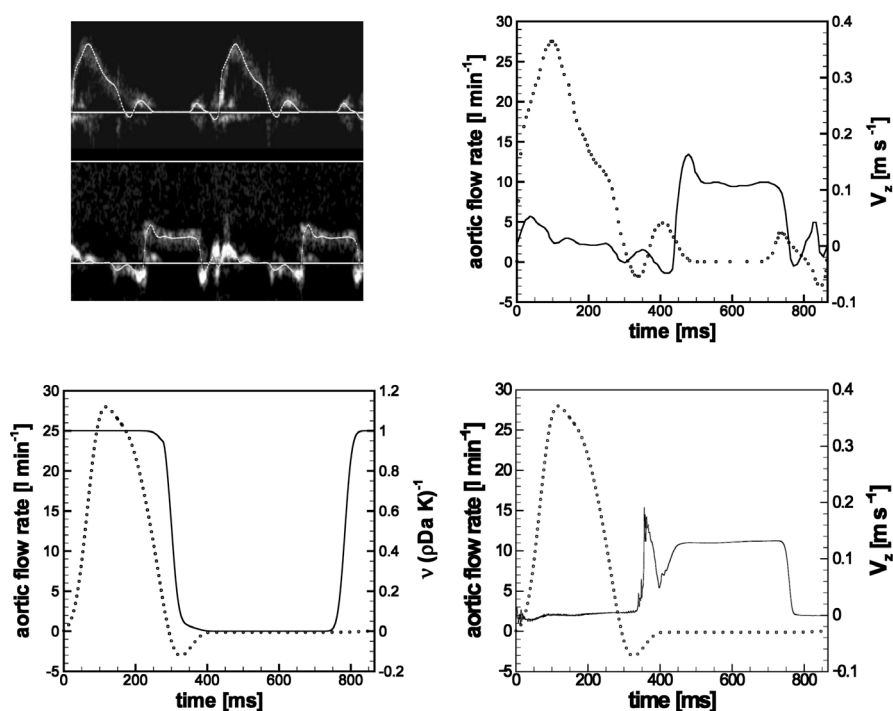


Fig. 3: (a) Aortic (upper) and coronaric (lower) velocity profiles by means of Pulse Wave Doppler echocardiography recorded in vivo in a young healthy man; (b) digitized aortic flow rate and mean coronaric velocity; (c) forcing term f'' (9) inside coronaries in function of time; (d) computed average velocity in left (continuous line) and right (dashed line, almost invisible superimposed on the continuous line) coronary channel with diameter of $D_c = 6$ mm; the aortic flow (dotted line) is also reported for reference.

tion of the myocardium compresses the intra-myocardial capillaries, resulting in a *throttling* of these vessels. This effect ceases during diastole when the myocardium relaxes, and, although it is stretched by ventricular dilatation, the blood can better flow through the coronaries under the driving pressure gradient. This leads to a pulsatile flow in which the resistance can not be simply related to the vessel radius. In this model we concentrate only on the very early vasculature of the coronary system, namely the two vessels connected to the Valsalva sinuses, assuming that everything downstream maintains the same behavior for different aortic geometries. Therefore, by *coronary blood flow* we indicate the flow through such main vessels, entering the coronary system, that is the only flow reasonably accessible for measurements. We have replaced the complex branching structure of the vascular system by two identical cylindrical tubes connected to the coronary ostia of the aorta in the two sinuses of Valsalva (see figure 1). In this way, the entrance region of the coronary vessels is correctly modeled both in terms of diameter and posi-

tion with respect with sinuses. The pressure gradient between the entrance region and the outflow of the tubes provides the driving force for the coronary flow. In order to mimic the above mentioned *tissue pressure effect* (Kajiya et al., 1993), that is the rhythmic contractions of the myocardium within each pumping cycle, a momentum loss for the points inside the main coronary vessels tracts (Γ_1 and Γ_2) is provided, as done in a porous medium, by adding a time-variable extra forcing term in the Navier-Stokes equation:

$$\mathbf{f}' = \frac{\nu(\mathbf{u} - \mathbf{V}_s)}{\rho Da K(t)}. \quad (9)$$

Here, \mathbf{V}_s is the forced velocity inside the porous medium, $Da = K_0/L^2$ is the Darcy number, with K_0 and L a reference permeability and reference length, respectively, and $K(t)$ is a new free time-dependent parameter that modulates the porosity. If $K(t) \rightarrow \infty$ the forcing vanishes and the standard Navier-Stokes equations are recovered: this is set during diastole, when the fluid is allowed to flow through coronaries. If $K(t) \rightarrow 0$ the forcing becomes dominant in the equation yielding $\mathbf{u} = \mathbf{V}_s$; by imposing $\mathbf{V}_s = 0$ the no-flux condition inside the coronaries is obtained during systole. The effect of the forcing (9) on the system (1) is exactly known only for the extreme values of K , none of which can be used in a computational code. Accordingly, a tuning was necessary in order to modulate the forcing between these two extrema in such a way to obtain a realistic coronary flow rate. More in detail, the forcing was tuned so to reproduce, for the setup with the ideal aortic root and a coronary diameter $D_c = 6$ mm, a physiological flow similar to that observed by Pulsed Wave Doppler echo-cardiographic recording in a human being (figure 3a). The flow profile in this individual, a young man, has been chosen as it corresponds, by an expert cardiology judgement, to the most typically observed flow profile found in normal healthy conditions. In particular, the tuning was necessary at early diastole (negative peak of flowrate) in order to limit the high velocity peak that the suddenly reduced resistance of the channels provides: after 330 ms, the slope of the forcing curve is changed, maintaining the forcing greater than zero for about 70 ms (see figure 3c). It is worth noting that in practice the value of K can not be ∞ , therefore during systole the computed coronary flow rate is not exactly zero but always negligible when compared to the main flow rate. Once \mathbf{f}' has been identified as in figure 3c it has been maintained identical in all other simulations in which other flow details than the coronary arteries have been modified.

2.5 Flow parameters and simulation details

We have assumed as main scaling quantities the inflow diameter $D_0 = 27$ mm and the bulk velocity at the peak inflow $U = 0.81$ m/s that with a blood kinematic viscosity $\nu = 3.04 \times 10^{-6}$ m²/s yield a Reynolds number $Re = UD_0/\nu = 7200$. The basic time unit is given by $D_0/U = 33.3$ ms so that, given the heart cycle of 866 ms,

the Strouhal number is $St = D_0/UT \simeq 3.85 \times 10^{-2}$. The leaflets are made of pyrolytic carbon, with density of $\rho_l = 2000 \text{ kg/m}^3$, whereas the blood density is $\rho_b = 1060 \text{ kg/m}^3$. In dimensional units each leaflet has a rotational inertia of $7.947 \times 10^{-9} \text{ kg m}^2$ that when scaled with $\rho_b D_0^5$ becomes $I_i = 2.77 \times 10^{-4}$, $i = 1, 2$ used in equations (3).

The aortic root, the valve housing and the leaflets are discretized with unstructured triangular meshes (Stereo Lithography format, STL) and are embedded into the background cylindrical structured grid. In a previous work (de Tullio et al., 2009), at the same Reynolds numbers and in a similar configuration, three computational grids were tested in order to assess the grid independence of the results. It was found that the required resolution was achieved with a grid made of $193 \times 137 \times 250$ nodes (about 6.6 millions points) in the azimuthal, radial and axial directions, respectively. In the present paper, we use an even finer grid made of $217 \times 165 \times 250$ nodes (about 8.95 millions points) in order to have enough grid points and accurately resolve the boundary layers in the tiny coronary channels. The grid is uniform in the azimuthal and radial directions, while it is non-uniform in the axial direction and clustered near the valve, where rich vorticity dynamics is observed.

Twenty cardiac cycles are computed for all cases. Each cycle is discretized by a variable time step ranging, in dimensionless units D/U_0 , from $\Delta t_{min} = 10^{-4}$, (about $3 \mu\text{s}$) occurring at the flow rate peak, to a maximum value of $\Delta t_{max} = 7.5 \times 10^{-3}$, (about $250 \mu\text{s}$) during the diastole. The CPU time for the computation of each complete cycle was equivalent to about 75 hours on a single P-IV processor, equipped with 2 Gb of RAM.

The inflow velocity profile is assigned by an hyperbolic tangent function with stretching parameter $\gamma = 60$ which yields a flat velocity distribution in the bulk and accommodates the no-slip boundary condition at the aortic wall within a layer of thickness $\lambda/D_0 = 1/\sqrt{Re} \simeq 1.2 \times 10^{-2}$. This velocity profile is modulated in time to mimic the physiological flow rate produced by the heart in the left ventricle (figure 3) similarly to what already done by Romano (2008) and de Tullio et al. (2009). The cycle duration was set at 866 ms, corresponding to about 70 beats/min (natural heart rate at rest). The mean flow rate was adjusted to about 5 l/min with a peak flow rate of about 28 l/min. These are typical physiological conditions under which an adult aortic valve operates.

3. Results

In several previous works (de Tullio et al., 2009, 2011b,a, 2012) detailed flow analyses for some configurations of the aortic root have been presented and validated against analogous flows and experiments available from the literature; readers are referred therein for more details. In the following, we only describe the key features of the flow.

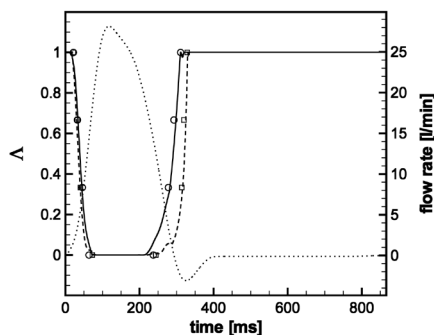


Fig. 4: Time variation of the phase-averaged leaflets angular position $\Lambda = \frac{(\alpha_{open} - \alpha)}{(\alpha_{open} - \alpha_{closed})}$ and flow rate (.....): comparison with experimental results (symbols) of Cerroni (2006). ---- and for \square leaflet B1 — and \circ for leaflet B2.

Looking at figure 4, the leaflets dynamics can be summarized as follows: The opening phase (SO) starts at the beginning of the systole when the flow starts accelerating, and ends before the conclusion of the flow acceleration by reaching the fully open position (EO). The leaflets remain fully open during the peak of the flow rate curve (FP). The closing phase (SC) starts only at the beginning of the steepest flow deceleration and ends at the minimum (negative) of the flow rate by reaching the fully closed position (EC). From figure 4 it is evident that the valve is already fully open when the flow rate reaches about three-fourth of the peak value, and it maintains this configuration for slightly less than 20% of the pulsating period T . The opening phase of the valve lasts about 8% of T , while closing lasts approximately 14% of T and strongly depends on the temporal variation of the flow rate. In particular, the closing time depends on how steep is the flow-rate decrease, since it is related to the adverse pressure gradient that, in turn, determines the leaflets angular acceleration. It is worth mentioning that from preliminary simulations we have observed the opening of the leaflets to have little sensitivity to the waveform of the flow-rate increase while, in contrast, the closing phase was strongly dependent either on the slope of the flow rate descent or on the minimum value of the curve (regurgitation).

Figure 5 shows out-of-plane vorticity contours in the longitudinal plane containing one of the coronary channels ($D-D$ plane of figure 1). The flow is sampled at four significant instants: (i) end opening of the leaflets; (ii) flow rate peak; (iii) start closure and (iv) end closure of the leaflets clearly showing the small scale turbulence production from the instability of the shear layers released from the leaflets and valve housing.

At the beginning of the cycle (SO) the flow is essentially stagnant owing to the absence of mean flow for more than half period of the preceding cycle that has

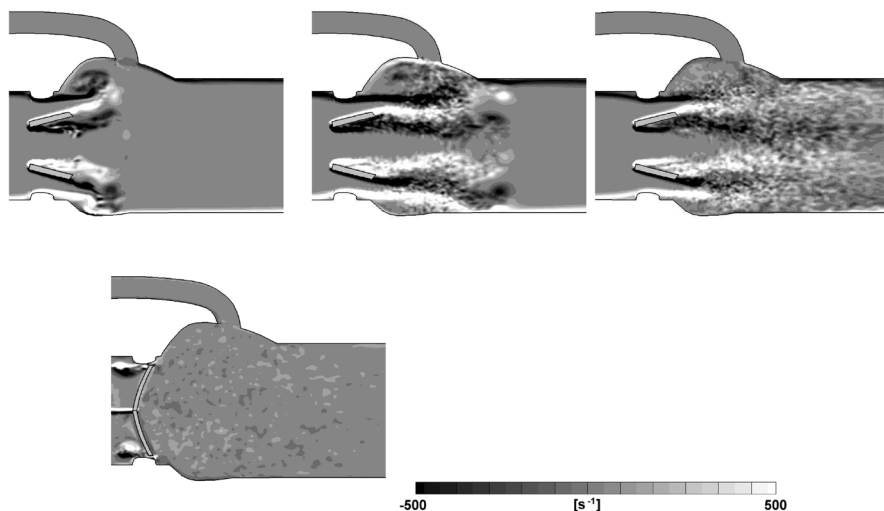


Fig. 5: Instantaneous out-of-plane vorticity contours in $\mathbf{D} - \mathbf{D}$ plane at four significant instants (from top-right to bottom-left): end opening of the leaflets; flow rate peak; start closure; end closure of the leaflets.

allowed the turbulence to settle down; the residual vortical structures however are rapidly washed away by the incoming flow as the flow rate increases. During the early opening phase the leaflets start rotating to form a time-varying three-orifice configuration with strong shear layers shed from the valve housing, and the tips of the leaflets as shown by figure 5. After the leaflets reach the fully open position, the flow rate keeps increasing up to the peak value (FP), thus strengthening the shear layers that become unstable. The bulk of the flow however is still laminar owing to the flow acceleration that prevents turbulence from developing. At this stage the recirculations within the Valsalva sinuses have the maximum intensity, and the mean flow downstream of the valve has the distinctive three-jet signature. Though essentially laminar, the shear layers released from the leaflets have a strong flapping motion that further enhances the flow unsteadiness. This is especially true for the upper leaflet whose wake interacts with the recirculation in the sinus of Valsalva and starts a small-scale production leading to turbulence when the flow rate decreases and an adverse pressure gradient starts to develop. The valve starts closing when the flow rate is just above one-half of the peak value, and the instantaneous as well as the mean flow are asymmetric in the two leaflets. This asymmetry is reflected also by the pressure field which causes the lower leaflet to close before the other. As the flow rate also keeps decreasing, the upper leaflet closes and the fully closed position is attained at the negative peak of the flow rate. In this configuration, most of the flow leaks through the small gaps that mimic the washing of the hinges and some minor leakage occurs also from the gaps between

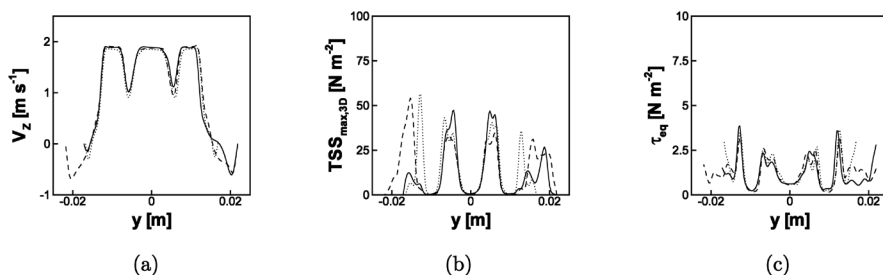


Fig. 6: Peak of flow rate: phase averaged streamwise velocity (a), maximum turbulent shear stress (b) and equivalent viscous stress (c) profiles in the plane of figure 1 in a section corresponding to the nadir of sinuses curvature. — : three sinuses root; ---- : axisymmetric root; : straight tube root.

the leaflets and between each leaflet and the valve housing. After this phase the turbulence in the bulk starts decaying owing to the absence of forcing provided by the mean flow and the decay continues up to the beginning of a new cycle.

Phase-averaged velocity profiles over twenty cardiac cycles have been computed, as well as maximum turbulent shear stress¹ and viscous stress² fields. Figure 6 reports the profiles of these fields in a section downstream of the valve, corresponding to the nadir of curvature of the sinuses. The data are sampled at the instant of the cycle corresponding to the flow rate peak ($t \simeq 140$ ms) in which the highest value of velocity is observed. In the panels we compare the profiles for three different configurations of the aortic root showing some differences only in the recirculation zone.

Figure 7 shows the pressure distribution at 366 ms, when the maximum coronary flow rate occurs; the total pressure difference is about about 15 mmHg showing little sensitivity to the particular aortic root geometry. Here we wish to stress that the IB method is capable to capture the highly localized pressure drop across the closed valve and the linear pressure decrease inside the coronary artery during its perfusion.

Another important result coming from these numerical simulations is the possibility to analyse and quantify the stresses induced on the structure by the fluid.

- 1 The maximum turbulent shear stress field is defined for each point by: $TSS_{max}^{3D} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, where σ_1 and σ_3 are the maximum and minimum principal shear stresses, obtained by the Reynolds stress tensor in the principal coordinate system and with a three-dimensional analysis (Popov, 1976; Malvern, 1977).
- 2 The reduction from the second-order viscous stress tensor to an equivalent scalar stress τ_{eq} has been performed according to the von Mises criterion used also by Apel et al. (2001). The expression of τ_{eq} is: $\tau_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\tau_{11}^2 + \tau_{22}^2 + \tau_{33}^2 - \tau_{11}\tau_{22} - \tau_{22}\tau_{33} - \tau_{11}\tau_{33} + 3(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)}$, where τ_{ij} are the viscous stress components.

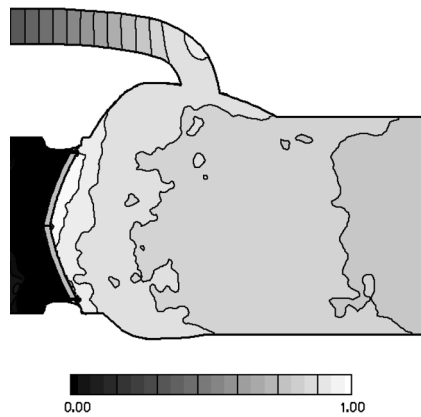


Fig. 7: Pressure distribution in the plane of figure 1 after valve closure: $\frac{p - p_{ref}}{\rho u_{ref}^2}$, where p_{ref} is the left ventricular pressure.

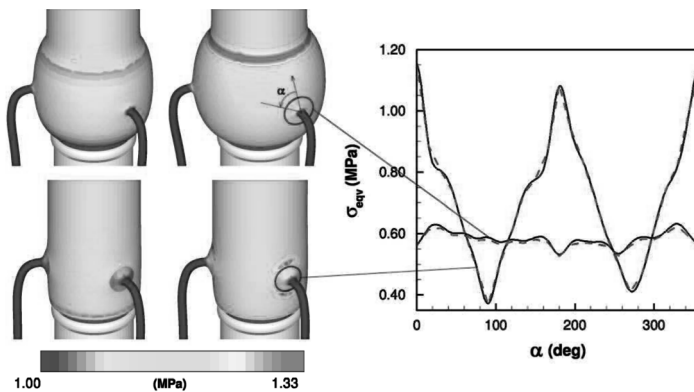


Fig. 8: Von Mises stress contours at minimum (left) and maximum (centre) levels of pressure during the cardiac cycle for the Valsalva (top) and straight pipe (bottom) aortic root. (Right) Von Mises stress in a circular region around the suture line.

This is particularly important either in biological tissues when some dilatation degeneration (aneurysm) is occurring and a prognostic information is needed or when a prosthetic device is implanted and the loads at the junctions between biologic and artificial tissues need to be evaluated. The latter case is particularly critical for the coronary arteries/aortic-root anastomoses whose bleeding is the major cause of surgery failure.

As an example of predictive capability of the present tool we show in figure 8 the surface stresses for two different geometrical configurations of the aortic root showing an advantage of the Valsalva-like one with respect to the straight tube.

4. Conclusions

In this paper, we have described a numerical tool for studying the pulsatile flow in the functional-unit aortic valve/aortic root/coronary arteries/ascending aorta with a realistic geometry so as to reproduce, as close as possible, the actual physiological conditions. This has been achieved by combining the immersed boundary method with a fluid-structure interaction algorithm that proved to be accurate and efficient. The main aim was to simulate the complete dynamics of the functional-unit without any compromise, either on the geometry of the system or on the flow physics. The results have been validated by a comparison with experimental data obtained for similar configurations (Cerroni, 2006; Romano, 2008); both the leaflets dynamics and the velocity fields are in satisfactory agreement, thus confirming the reliability of the numerical data. The main bottom line of this numerical tools is its inexpensiveness; first of all this technique does not need a body conformal mesh that, on account of the complex geometry with parts in relative motion, would imply a considerable computational overhead. In addition, the flow solver largely benefits from solutions on simple grids; the present simulations, in fact, could be carried out on grids in the range 6.6–10 millions of nodes using about 1.6×10^4 time steps per heart cycle within less than 2 Gb of RAM memory on a 3 GHz P-IV in about 75 h per cycle (single processor time equivalent).

Before concluding this paper we point out that the same package has been extensively used to investigate the phenomenon of hemolysis induced by the mechanical valve that requires the Lagrangian tracking of fluid particles and the evaluation of the stresses and their exposure time in order to quantify the damage of the cell membranes; many details and results can be found in de Tullio et al. (2012).

Recent investigations have accounted for the non-Newtonian nature of the blood showing that, despite the common belief that blood behaves as a Newtonian liquid in large vessels this is not always true for the present problem De Vita et al. (2013). This turned out to be particularly true for the hemolysis that resulted increased by a 20% for the non-Newtonian model.

Finally, although in the present paper only mechanical valves have been presented, the model is already capable of handling biological valves with the leaflets that are deformable rather than rigid. This has been achieved by solving equations (5)–(6) also for the aortic valve although a substantial additional computational time was needed to account for the large displacements of the three deforming leaflets.

Acknowledgments

The help and advice of L. Afferrante, G. Pascazio, R. De Paulis, L. Weltert and E. Balaras is gratefully acknowledged by the authors.

References

- APEL, J., P. REINHARD, S. KLAUS, T. SIESS & H. REUL 2001: Assessment of hemolysis related quantities in a microaxial blood pump by computational fluid dynamics. *Artificial Organs* **25**(5), 341–347.
- BENTALL, H. & A. DE BONO 1968: A technique for complete replacement of the ascending aorta. *Thorax* **23**, 338–339.
- BORAZJANI, I., L. GE, P.L. DAS, F. SOTIROPOULOS & A.P. YOGANATHAN 2007: Fluid-structure interaction in bi-leaflet mechanical heart valves. In *2nd Frontier in Biomedical Devices Conference*. June 7–8, California, USA, BioMed 2007-3807.
- CERRONI, G. 2006: Studio sperimentale del campo fluidodinamico a valle di una valvola cardiaca artificiale e in un dispositivo di circolazione assistita mediante tecnica PIV. Master's thesis, Università degli studi di Roma, La Sapienza, Facoltà di Ingegneria.
- COCHRAN, R.P., K.S. KUNZELMAN, A.C. EDDY, B.O. HOFER & E.D. VERRIER 1995: Modified conduit preparation creates a pseudosinus in an aortic valvesparing procedure for aneurysm of the ascending aorta. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* **109**, 1049–1058.
- CRISTALLO, A. & R. VERZICCO 2006: Combined immersed boundary/large-eddy-simulations of incompressible three dimensional complex flows. *Flow, Turbulence and Combustion* **77**, 326.
- DAS, L.P., L. GE, H.A. SIMON, F. SOTIROPOULOS & A. YOGANATHAN 2007: Vorticity dynamics of a bileaflet mechanical heart valve in an axisymmetric aorta. *Physics of Fluids* **19**, 1–17.
- DAVID, T.E., S. ARMSTRONG, J. IVANOV, C.M. FEINDEL, A. OMRAN & G. WEBB 2001: Results of aortic valve-sparing operations. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* **122**, 39–46.
- DAVID, T.E. & C.M. FEINDEL 1992: An aortic valve-sparing operation for patients with aortic incompetence and aneurysm of the ascending aorta. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* **103**, 617–622.
- DE PAULIS, R., F. TOMAI, F. BERTOLDO, A.S. GHINI, R. SCAFFA, P. NARDI & L. CHIARELLO 2004: Coronary flow characteristics after a Bentall procedure with or without sinuses of Valsalva. *European journal of cardio-thoracic surgery* **26**, 66–72.
- DE VITA, F., M.D. DE TULLIO & R. VERZICCO 2013: Numerical simulation of the blood flow in the aortic root with a non-newtonian fluid model. In *AIMETA Conference 2013*, Torino, Italy., pp. 1–8. AIMETA.
- FADLUN, E.A., R. VERZICCO, P. ORLANDI & J. MOHD-YOSUF 2000: Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations. *J. Comput. Phys.* **161**, 35.
- IACCARINO, G. & R. VERZICCO 2003: Immersed boundary technique for turbulent flow simulations. *Appl. Mech. Rev.* **56**, 331.

KAJIYA, F., S. MATSUOKA, Y. OGASAWARA, O. HIRAMATSU, S. KANAZAWA, Y. WADA, S. TADAOKA, K. TSUJIOKA, T. FUJIWARA & M. ZAMIR 1993: Velocity profiles and phasic flow patterns in the non-stenotic human left anterior descending coronary artery during cardiac surgery. *Cardiovascular Research* **27**, 845–850.

KARCK, M. K. KALLENBACH, C. HAGL, C. RHEIN, R. LEYH & A. HAVERICH 2004: Aortic root surgery in marfan syndrome: Comparison of aortic valve-sparing reimplantation versus composite grafting. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* **127**, 391–398.

MALVERN, L.E. 1977: *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc.

NICHOLS, W.W. & M.F. O’ROURKE 1990: *McDonald’s blood flow in arteries*. Lea & Febiger, Philadelphia, PA.

NOBILI, M., U. MORBIDUCCI, R. PONZINI, C. DEL GAUDIO, A. BALDUCCI, M. GRIGIONI, F.M. MONTEVECCHI & A. REDAELLI 2008: Numerical simulation of the dynamics of a bilea et prosthetic heart valve using a fluid-structure interaction approach. *Journal of biomechanics* **41**, 2539–2550.

POPOV, E.P. 1976: *Mechanics of materials*, 2nd ed.. Englewood Cliffs, Prentice Hall Inc.

ROMANO, G.P. 2008: Deliverable d24-study case report n 2 pulse duplicator with aortic root model from rwth aachen smart-piv ist-2002-37548 european project. <http://www.smart-piv.com>.

SARSAM, M.A. & M. YACIOUB 1993: Remodeling of the aortic valve anulus. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* **105**, 435–438.

SOTIROPOULOS, F. & I. BORAZJANI 2009: A review of the state-of-the-art numerical methods for simulating flow through mechanical heart valves. *Medical & Biological Engineering & Computing* **47**, 245–256.

SWARTZRAUBER, P.N. 1974: A direct method for the discrete solution of separable elliptic equations. *SIAM J. Numer. Anal.* **11**, 113–150.

DE TULLIO, M.D., L. AFFERRANTE, G. DEMELIO, G. PASCAZIO & R. VERZICCO 2011a: Fluid-structure interaction of deformable aortic prostheses with a bilea et mechanical valve. *J. of Biomechanics* **44**, 1684–1690.

DE TULLIO, M.D., A. CRISTALLO, E. BALARAS & R. VERZICCO 2009: Direct numerical simulation of the pulsatile flow through an aortic bilea et mechanical heart valve. *Journal of Fluid Mechanics* **622**, 259–290.

DE TULLIO, M.D., J. NAM, G. PASCAZIO, E. BALARAS & R. VERZICCO 2012: Computational prediction of mechanical hemolysis in aortic valved prostheses. *Eur. J. of Mech. B/fluids* **35**, 47–53.

DE TULLIO, M.D., G. PEDRIZZETTI & R. VERZICCO 2011b: On the effect of the aortic root geometry on the coronary entry-flow after a bilea et mechanical heart valve implant: a numerical study. *Acta Mechanica* **216**, 147–163.

VERZICCO, R. & P. ORLANDI 1996: A finite difference scheme for three-dimensional incompressible flows in cylindrical coordinates. *Journal of Computational Physics* **123**, 402–413.

WELTERT, L., R. DE PAULIS, R. SCAFFA, D. MASELLI, A. BELLISARIO & S. D'ALESSANDRO 2009: Re-creation of a sinuslike graft expansion in Bentall procedure reduces stress at the coronary button anastomoses: A finite element study. *Journal of thoracic and cardiovascular surgery* **137**, 1082–1087.

YACOB, M.H. 1996: Valve-conserving operation for aortic root aneurysm or dissection , pp. 57–67. Philadelphia: WB Saunders.

YANG, J., S. PREIDIKMAN & E. BALARAS 2008: A strongly-coupled embedded boundary method for fluid-structure interaction of elastically mounted rigid bodies. *J. Fluids and Structures* **182**, 167–182.

ZAMIR, M. 2005: *The Physics of Coronary Blood Flow*. Springer.

FESTVERSAMMLUNG IM ALTSTADTRATHAUS

PROF. DR.RER.NAT. DR. H.C. JOACHIM KLEIN

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Begrüßung

Hohe Festversammlung,
verehrte Gäste,
meine sehr verehrten Damen und Herren,

zur Jahresversammlung 2013 unserer Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft darf ich Sie alle sehr herzlich begrüßen und in der Dornse des Altstadtrathauses willkommen heißen. Durch Ihre Anwesenheit beweisen Sie Ihr Interesse an unserer akademischen Institution und ihrer Arbeit, und für diese Verbundenheit sind wir Ihnen dankbar.

Der wissenschaftliche Kern unserer Festveranstaltung ist seit 64 Jahren die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille für herausragende wissenschaftliche Leistungen. Dazu haben wir im Jahr 2013 wieder einen Preisträger aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften erkoren: Es ist dies:

Herr Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder

Lehrstuhl für Strömungslehre und
Aerodynamisches Institut der RWTH Aachen.

Ich darf Sie, sehr geehrter Herr Kollege Schröder, in Begleitung Ihrer Frau, in unserer Mitte besonders herzlich begrüßen und Ihnen danken, dass Sie zur Entgegennahme der Auszeichnung nach Braunschweig gekommen sind. Ich hoffe und wünsche, dass Sie sich in unserer Mitte und im Kreis Ihrer Vorgänger als Gauß-Medaillenträger wohl fühlen werden.

Damit Sie – und auch alle Gäste erfahren –, in welchem Kreis sie sich befinden, darf ich nun einige Gäste besonders und auch namentlich begrüßen.

Mein erster besonderer Gruß gilt unserer Frau Bürgermeisterin Friederike Harlfinger. Ich danke Ihnen, liebe Frau Harlfinger, nicht nur für Ihr Erscheinen, sondern auch dafür, dass Sie das Grußwort der Stadt Braunschweig an uns überbringen werden. Wir sind der Stadt dankbar, dass wir uns unseren Gästen in diesen historischen Räumen präsentieren dürfen und auch somit in vielfältiger Weise die Unterstützung der Stadt erfahren.

Die enge Verbindung zur Stadt Braunschweig wird auch dadurch deutlich, dass Sie, lieber Herr Kohl, als Ehrenbürger, und Sie, lieber Herr Steffens, als langjähriger ehemaliger Oberbürgermeister unserer Einladung gefolgt sind – seien Sie herzlich willkommen.

Als Körperschaft des öffentlichen Rechts sind wir eine Institution des Landes Niedersachsen, das im Niedersächsischen Landtag seine Repräsentation findet. So freue ich mich, Herrn Klaus-Peter Bachmann als Vizepräsidenten und Herrn Christos Pantazis als Mitglied des Landtages unter uns begrüßen zu können. Der Haushalt des Landes liefert die verlässliche finanzielle Basis für unsere Arbeit, und es ist mir wichtig, Ihnen dafür stellvertretend zu danken.

Für die Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften in Halle – darf ich Herrn Kollegen Karl-Heinz Glaßmeier, für die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen Herrn Kollegen Henning Hopf als Vertreter der jeweiligen Präsidenten herzlich begrüßen. Ich danke den befreundeten Akademien für dieses Zeichen der Verbundenheit.

Die Wissenschaft im Raum Braunschweig ist durch den Verbund ForschungRegion Braunschweig e.V. seit Jahren erfolgreich vernetzt. Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat sich seit der Gründung in diesem Kreis besonders engagiert, und so freue ich mich, dass in diesem Jahr zahlreiche Institutionen vertreten sind. So begrüße ich die Kollegen Gerd Biegel, Institut für Braunschweigische Regionalgeschichte, Joachim Block, Leiter des Standortes Braunschweig des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Ulrich Joger, Naturhistorisches Museum, Jens Overmann, Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, Angela Klein als Mitglied im Vorstand der ForschungRegion Braunschweig e.V. und Klaus Ritscher als Mitglied der Lessing-Akademie, Wolfenbüttel.

Darüber hinaus sind zahlreiche Gäste aus Universitäten und wissenschaftlichen Instituten unserer Einladung gefolgt, die ich hiermit herzlich willkommen heißen darf.

Ich begrüße unsere Gäste, die aus anderen Bereichen, der Wirtschaft, der Verwaltung, zu uns gekommen sind. Und sehr herzlich heiße ich abschließend all unsere Mitglieder und ihre Begleitungen sowie die Witwen unserer verstorbenen Mitglieder herzlich willkommen.

Ich darf nun Sie, verehrte Frau Harlfinger, bitten, das Grußwort der Stadt zu überbringen.

Bericht

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

zu Beginn meines Berichtes ist es meine traurige Pflicht, der im Berichtsjahr verstorbenen Mitglieder unserer Gesellschaft zu gedenken.

Nachrufe

Am 19.11.2012 verstarb im Alter von 98 Jahren Hans-Joachim Kanold, Dr.rer.nat. habil., Professor em. für Mathematik, TU Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1971. Generalsekretär vom 01.01.1986 bis 31.12.1988.

Am 25.11.2012 verstarb Hans Kuhn, Dr.phil. Dr.rer.nat. h.c., Professor für Biophysikalische Chemie und vormals Direktor am Max-Planck-Institut, Göttingen. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1983. Träger der Gaußmedaille 1980.

Ein besonderes Wort des Gedenkens hat Hans-Joachim Kanold verdient: In Wahrnehmung seiner Verpflichtung als ordentliches Mitglied der BWG war er über Jahrzehnte beispielhaft. Bis ins hohe Alter hat er auf dem Gebiet der Zahlentheorie gearbeitet und publiziert – seine lebendigen Vorträge mit Tafel und Kreide sind uns unvergesslich ebenso seine humorvollen und scharfsinnigen Diskussionsbeiträge und Dankesreden.

Den Verstorbenen werden wir ein ehrendes Gedenken bewahren – und ich danke Ihnen, dass Sie sich von Ihren Plätzen erhoben haben.

Zuwahlen und personeller Stand

Das Recht der Zuwahl gibt uns die Möglichkeit, Lücken im Fächerspektrum zu schließen und auch, dem stetigen Wandel der Wissenschaft folgend, neue Themenbereiche für uns zu gewinnen.

Gewählt wurden zu ordentlichen Mitgliedern in der **Wahlsitzung vom 14.12.2012:**

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

- Prof. Dr.rer.nat. Knut **Baumann**
Professor für Pharmazeutische Chemie an der TU Braunschweig
- Prof. Dr.rer.nat. Jens-Peter **Kreiß**
Professor für Mathematik an der TU Braunschweig
- Prof. Dr.rer.nat. Rainer **Löwen**
Professor für Mathematik an der TU Braunschweig

Klasse für Ingenieurwissenschaften

- Prof. Dr.-Ing. Klaus **Dilger**
Professor für Füge- und Schweißtechnik an der TU Braunschweig

- Prof. Dr.rer.nat. Andreas **Rausch**
Professor für Informatik an der TU Clausthal
- Prof. Dr.-Ing.habil. Raimund **Rolfes**
Professor für Statik und Dynamik an der Leibniz Universität Hannover

Klasse für Geisteswissenschaften

- Prof. Dr.phil. Simone **Lässig**
Professorin für Neuere und Neueste Geschichte, Direktorin des Georg-Eckert-Instituts für Internationale Schulbuchforschung

Zum korrespondierenden Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften:

- Prof. Dr.phil. Dr.h.c.mult. Werner **Oechslin**
Professor em. für Geschichte und Theorie der Architektur an der ETH Zürich
Gaußpreisträger des Jahres 2013

In der **Wahlsitzung vom 12.04.2013:**

Klasse für Ingenieurwissenschaften

- Prof. Dr.-Ing. Manfred Norbert **Fisch**
Professor für Gebäude- und Solartechnik an der TU Braunschweig

Damit gehören der BWG am 26.04.2013 an: 151 ordentliche Mitglieder, davon 81 unter 70 Jahren, sowie 72 korrespondierende Mitglieder.

In der Leitungsebene unserer Gesellschaft gab es folgende Veränderungen:

Im Dezember 2012 wurden für die 3jährige Amtszeit 2013 bis 2015 gewählt:

zum Vizepräsidenten:

Prof. Dr. Dietmar Brandes vom 01.01.2013 bis 31.12.2015

zum Vorsitzenden der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften:

Prof. Dr. Hans-Dieter Ehrich vom 01.01.2013 bis 31.12.2015

Herr Brandes übernahm dieses Amt von Herrn Scheier, und es ist mehr als geboten, Ihnen, lieber Herr Scheier, für Ihr langjähriges Wirken – ich spreche von vier Amtsperioden oder 12 Jahren – besonders zu danken. Qualität und Quantität unserer Publikationsreihen zu steuern und zu sichern, ist Ihnen in hervorragender Weise gelungen: eine für das äußere Erscheinungsbild unserer BWG zentrale Aufgabe. Nun steht zu Recht wieder die Philosophie im Mittelpunkt Ihres Schaffens.

Sie, lieber Herr Brandes, haben mit Umsicht, Energie und Geduld als Leitender Bibliotheksdirektor die „Welt der Bücher“ beherrscht und damit der Wissenschaft an unserer TU in ihrer ganzen Breite gedient. Wenn Sie nun diesen Erfahrungsschatz in die Welt der BWG übertragen, haben wir alle gewonnen.

Im Vorsitz der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften hat der Informatiker Hans-Dieter Ehrich von dem Biologen Thomas Hartmann übernommen. Herr Hartmann war für zwei Amtsperioden Vorsitzender der Klasse und hat auch viele Impulse für die Arbeit der BWG insgesamt gegeben. Auch dafür gilt unser besonderer Dank.

Veranstaltungen

Den Auftrag, den interdisziplinären wissenschaftlichen Gedankenaustausch zu pflegen, nehmen die Mitglieder der BWG in ihren internen Sitzungen wahr. Insgesamt fanden im Berichtsjahr 9 Plenarversammlungen sowie 15 Sitzungen der Klassen statt. Über Themen und Inhalt gibt das Jahrbuch 2012 Auskunft, das soeben erschienen ist und Ihrer Lektüre empfohlen sei.

Kurz möchte ich nur zwei Aspekte hervorheben.

1. Im Oktober 2012 fand in Braunschweig eine gemeinsame Sitzung mit der Göttinger Akademie der Wissenschaften statt, die inhaltlich durch die Vorträge der Göttinger Kollegen zum Thema „Die Entstehung des Lebens“ geprägt war. Dieses Zeichen der engen Verbundenheit mit unserer älteren akademischen Schwester in Göttingen möchte ich auch heute besonders würdigen.

2. Mit dem Ziel, die Interessen der drei Klassen stärker zu vernetzen, haben wir begonnen, das Konzept der Thementage einzuführen: In einer Plenarversammlung wird dabei ein Leitthema aus dem Blickwinkel unserer drei Klassen in seiner Diversität beleuchtet und diskutiert. Nach erfolgreichem Start unter dem Motto „Modell in der Wissenschaft“ soll dieses Format seine Fortsetzung finden.

Neben der internen Arbeit sehen wir es als unsere Hauptaufgabe an, mit Veranstaltungen in der Öffentlichkeit die Basis für den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft zu verbreitern und zu stärken.

Ein wichtiges Instrument dieser Öffentlichkeitsarbeit sind unsere Vortragsreihen. Seit dem Braunschweiger Wissenschaftsjahr 2007 gehört dazu die Reihe

„Akademie-Vorlesung im Schloss“.

Wichtige Elemente dieses Konzepts sind der Vortragsort „Roter Saal“ im Zentrum der Stadt und die Kooperation mit dem Kulturinstitut der Stadt Braunschweig. Im

nunmehr sechstem Jahr gelingt es uns dadurch offensichtlich, ein hoch interessantes Publikum aus breiten Bevölkerungskreisen zu erreichen. Die Leitthemen „Phänomen Zeit“ und „Phänomen Raum“ erlauben uns, vielfältige Aspekte der Wissenschaft zur Diskussion zu stellen.

Eine ähnliche Erfolgsgeschichte ist die Vortragsreihe, die wir seit Jahren im phäno in Wolfsburg anbieten, die traditionell auch in Kooperation mit der Akademie der Wissenschaften in Göttingen gestaltet wird. Die Themenwahl erfolgt in Anknüpfung an Sonderausstellungen, so zum Thema „Kugeln und Kugelbahnen“ oder „Licht“.

Ein jährlich wiederkehrendes Ereignis ist die „Verleihung des Braunschweiger Bürgerpreises für herausragende studentische Leistungen“, die jeweils zum „Nikolaustag“ 6. Dezember im Braunschweigischen Landesmuseum stattfindet. Hier trägt die BWG durch Einladung eines prominenten Wissenschaftlers zum wissenschaftlichen Höhepunkt der Veranstaltung bei.

Ein selteneres und aus meiner Sicht wichtiges Ereignis ist die Verleihung des „Abt-Jerusalem-Preises“, der für herausragende wissenschaftliche Beiträge zum Dialog der Geistes-, Natur- und Technikwissenschaften im dreijährigen Rhythmus vergeben wird. Als Preisstifter haben sich dazu die Braunschweigische Landeskirche, die Technische Universität Braunschweig und die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft zusammengeschlossen, um im Gedenken an das bildungspolitische Wirken des Abtes ein Zeichen für die Bedeutung der Verknüpfung der Wissenschaften zu setzen.

Im Jahr 2012 wurde mit diesem Preis das beispielhafte Wirken des Wissenschaftshistorikers Wolfgang König, Berlin gewürdigt. Die Preisverleihung wurde von einem wissenschaftlichen Symposium zum Thema „Bildung und Bildungsgechtigkeit“ begleitet.

Eine Veranstaltung mit besonderem Charakter war die Eröffnung einer Gedenkausstellung von „Notaten und Grafiken“ für Werner Deutsch. Gemeinsam mit der Universitätsbibliothek der TU Braunschweig haben wir noch einmal auf das vielfältige Wirken unseres leider zu früh verstorbenen Kollegen zurückgeblickt und uns angesichts von künstlerischen Widmungsarbeiten seiner ausstrahlenden Persönlichkeit erinnert.

Die dauerhafte Dokumentation dieser und weiterer Arbeiten verdanken wir unseren Publikationsorganen, von denen das Jahrbuch 2012 pünktlich zu unserem heutigen Termin erschienen ist. Der Redaktion und dem Verlag J. Cramer, vertreten durch Frau Christina Jäcker, danke ich für die gelungene inhaltliche und zeitliche Punktlandung. Wichtig ist mir auch der Hinweis, dass die Texte der Jahrbücher und der Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft inzwischen in Zusammenarbeit mit der Bibliothek der TU digitalisiert wurden und im Internet, auch über die Homepage der BWG, elektronisch verfügbar

sind. Damit haben wir auch einen wichtigen Schritt in Richtung elektronischer Publikation getan, dem sicher weitere folgen werden.

All diese Arbeit, über die ich Ihnen berichten durfte, ist nur möglich als engagierte Gemeinschaftsarbeit, für die ich mich

- beim Präsidium
 - bei den Klassenvorsitzenden
 - bei allen Mitgliedern und Kooperationspartnern und
 - nicht zuletzt bei einer kompetenten und einsatzbereiten Geschäftsstelle
- bedanken darf.

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

nach diesem eher formal geprägten, aber für uns deshalb nicht weniger wichtigem Bericht, darf ich nun auf den wissenschaftlichen Kern unserer Festveranstaltung, die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille 2013, zu sprechen kommen.

Auf Vorschlag der Klasse für Ingenieurwissenschaften ist die Wahl auf

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröder,
Direktor des Aerodynamischen Instituts der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen,

gefallen, und ich darf Sie, sehr geehrter, lieber Herr Kollege Schröder, zur Entgegennahme der Auszeichnung heute nochmals sehr herzlich begrüßen.

Der Lehrstuhl, den Sie innehaben, und das Institut, an dem Sie in Aachen wirken, hat eine ruhmreiche Tradition: Einer Ihrer Vorgänger als Universitätslehrer und auch erster Direktor des 1913 gerade fertig gestellten Instituts für Flugtechnische Aerodynamik war mit Theodor von Karman ebenfalls Träger unserer Gaußmedaille, und zwar 1960. Wir sind heute noch stolz, diesen 1934 aus Deutschland Vertriebenen und in den USA wirkenden Pionier der Flugtechnischen Aerodynamik als Preisträger zu haben. Es kennzeichnet die Bedeutung des Faches und die Leistungsfähigkeit der Wissenschaftler, dass erstmals die Gaußmedaille an das gleiche Institut verliehen wird.

Natürlich verleihen wir die Gaußmedaille nicht auf der Basis einer historisch bedeutsamen Tradition, sondern auf der Basis aktueller wissenschaftlicher Leistungen an der Front Forschung. Es sind vor allem die besonders leistungsfähigen Methoden der numerischen Mathematik, welche in Verbindung mit höchsten, früher nie gekannten Hochleistungsrechnern über den Weg der Simulation zu neuen Erkenntnissen verhelfen. Zum anderen war uns wichtig, auf die Bedeutung

des Wissenstransfers in bislang fremde Wissenschaftsbereiche hinzuweisen. Dies war auch der Grund, für das Kolloquium am Vormittag das Thema „Ingenieurwissenschaften und Medizintechnik – die Strömungsmechanik im inter-disziplinären Kontext“ zu wählen und damit die Impulse zu würdigen, welche unser Preisträger für die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Medizinern gegeben hat.

In ihren spannenden Vorträgen haben uns die Kollegen Thomas Schmitz-Rode, AME Aachen, Roberto Verzicco, Universität Rom, und Wolfgang Wall, TU München, über den erfolgreichen Einsatz der Strömungsmechanik bei medizinischen Fragestellungen berichtet. Dafür möchte ich Ihnen auch in diesem Rahmen noch einmal sehr herzlich danken, ebenso unserem Kollegen Manfred Krafczyk, der dieses Symposium so kompetent moderierte.

Aber die Medizin ist nur eines der Themen, auf denen Wolfgang Schröder seine Verdienste erworben hat. Den Einblick in diese wissenschaftliche Gesamtleistung wird uns dann Herr Kollege Rolf Radespiel in seiner Laudatio vermitteln.

Und abschließend freuen wir uns auf den Festvortrag unseres Preisträgers, der den Bezug zur Medizin wieder aufgreifen wird: „Humane numerische Strömungsmechanik – vom Nasen-modell zur realen Nase“. Wir sehen mit Spannung der Frage entgegen, wie es angesichts der offensichtlichen anatomischen Vielgestalt dieses menschlichen Sinnesorgans zu allgemeinen – oder individuellen? – Aussagen kommen kann.

Bevor jedoch diese wissenschaftliche Sektion unserer Festveranstaltung beginnt, möchte ich das Podium noch einmal der Musik übergeben. Unsere drei Musiker Frank Strauch, Michael Hussing und Udo Peil liefern mit dem sonoren Ton ihrer Bassett-Hörner die Klangerlebnisse, die uns ohne Worte erfreuen, und für die ich ihnen herzlich danke.

Und ich danke Ihnen, dass Sie mir zugehört haben.

Laudatio zur Verleihung der Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft an Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schroeder

PROF. DR.-ING. ROLF RADESPIEL

Institut für Strömungsmechanik der Technischen Universität Braunschweig
Hermann-Blenk-Str. 37, D-38108 Braunschweig

Sehr geehrte Damen und Herren,

lassen Sie mich diese Laudatio mit der Erinnerung an die Verdienste des großen Wissenschaftlers Carl Friedrich Gauß von 1777–1855 beginnen. Gauß legte mit der Methode der kleinsten Quadrate, der Gauß'schen Glockenkurve und des Fehlerfortpflanzungsgesetzes wichtige Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Der Gauß'sche Integralsatz ist die Grundlage der heute verwendeten Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Von Gauß stammen wichtige Methoden zur Lösung von Gleichungssystemen und zur Verwendung der komplexen Zahlen. Mit diesen und vielen weiteren genialen Erfindungen in der Mathematik machte er eine ungeahnte Genauigkeit in der Landesvermessung, genaue Berechnungen von Planetenbahnen, die Berechnung physikalischer Felder und viele andere, neue Anwendungen zugänglich. In der Physik erfand er wichtige Grundlagen der Elektrizitätslehre, und mit Weber das Magnetometer, sowie die erste Telegrafenverbindung.

Die genauen Berechnungen von Strömungen sind demgegenüber ein wissenschaftliches Gebiet des 20. und des 21. Jahrhunderts. Was ist aber das Besondere an dem Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen, sogenannter Fluide im Vergleich zu den in vielerlei Hinsicht einfacheren festen Körpern? Nun, bei einer äußeren Belastung, zum Beispiel durch die Änderung des Druckes in einer gasgefüllten Leitung ergibt sich für Fluide eine fortwährende Formänderung, und das bezeichnet man als Strömen. Feste Körper zeigen dagegen unter Belastung eine elastische, aber statische Verformung. Deshalb müssen bei Fluiden ständig Beschleunigungsvorgänge von Ort zu Ort und in Abhängigkeit von der Zeit berücksichtigt werden und man spricht deshalb von der Fluidodynamik und im Fall von gasförmigen Fluiden von der Aerodynamik. Natürlich kann das Strömen von Fluiden auch mit Gleichungen beschrieben werden. Dieses sind nichtlineare sogenannte Differentialgleichungen. Eine Lösung dieser Gleichungen gelingt in den meisten Fällen nur näherungsweise mit aufwändigen Berechnungsprogrammen auf leistungsfähigen Rechnern mit zahlreichen, parallel arbeitenden Berechnungskernen.

Auf diesen Grundlagen beruhen zwei wichtige Forschungsgebiete der Strömungsdynamik, nämlich erstens die Entwicklung von möglichst effizienten, das heißt

genauen und gleichzeitig auch schnellen Berechnungsvorschriften zur Simulation, d.h. Vorhersage von Strömungen, und zweitens das sogenannte Jahrhundertproblem der Turbulenz in Strömungen. Mit beiden Forschungsgebieten befasst sich Wolfgang Schröder.

Wolfgang Schröder ist 56 Jahre alt und stammt aus dem niederrheinischen Neuss. Er hat an der RWTH Aachen Maschinenbau studiert und wurde von dort auch im Jahr 1987 zum Doktor der Ingenieurwissenschaften promoviert. Während einer zweijährigen Tätigkeit als Post-Doc beim weltbekannten CalTech in Pasadena hat er die Dynamik von Wirbelströmungen erforscht und ich meine, er hat dort auch einen Teil seines kalifornisch-sonnigen Gemüts entwickelt. Zurück in Deutschland machte er einen Sprung zur Raumfahrtindustrie, bei der damaligen DASA-AG in Ottobrunn in München, wo er bis zum Jahr 1995 die numerische Aerodynamik von zukünftigen Raumtransportern leitete. In diesem Bereich geht es darum, die thermischen und mechanischen Belastungen zu berechnen, die während des extrem schnellen Flugs in der Atmosphäre bei Raumfahrtmissionen auftreten. Irgendwann hat dann aber Wolfgang Schröders Herz für die Wissenschaft in Lehre und Forschung obsiegt und er wechselte 1995 zunächst auf die Professur für Mathematik und Statistik an der Fachhochschule Braunschweig-Wolfenbüttel, bevor er 1998 den Ruf als Universitätsprofessor und Direktor des renommierten Aerodynamischen Instituts der RWTH Aachen annahm.

Kollegen oder Doktoranden, die das Glück haben, mit Wolfgang Schröder gemeinsam unterwegs zu sein, bemerken, dass er über einen schier unerschöpflichen, persönlichen Vorrat an Energie verfügt, sein Interesse für neue Ideen nie ruht, und dass Wolfgang Schröder scheinbar keinen Schlaf benötigt. Mit diesen drei sehr nützlichen Eigenschaften für Forscher ausgestattet bohrt Wolfgang Schröder die dicken Bretter der Strömungsmechanik.

Von den beiden von mir bereits erwähnten, zwei großen Arbeitsgebieten der Strömungsdynamik, den effizienten Berechnungsmethoden und der Turbulenz, hat er am erstgenannten kontinuierlich über mehr als 30 Jahre gearbeitet. Die von ihm und seinem Team in Aachen entwickelten Berechnungsprogramme, sogenannte Codes zur Simulation von Strömungsvorgängen zählen heute international zu den besten. Wolfgang Schröder hat sich in vielfacher Hinsicht auch mit dem fundamentalen Turbulenzproblem befasst. Turbulenz ist dadurch gekennzeichnet, dass scheinbar willkürliche Bewegungen in vielen natürlichen und technischen Strömungen auftreten, wie jedermann z.B. an den aufsteigenden Abgasen über einem Schornstein durch genaues Beobachten sehen kann. Man erkennt dabei, dass eine andauernde Wirbelbewegung in der nach oben gerichteten Strömung auftritt, die in sehr unterschiedlichen Größenordnungen, sogenannten Skalen auftritt und eine starke, vermischende Wirkung besitzt. Die Wirkung der Turbulenz ist bedeutend in außerordentlich vielen, technischen Anwendungen der Flugtechnik, Fahrzeugtechnik, Energietechnik, Verfahrenstechnik, im Bauingenieurwesen und

in natürlichen Strömungsvorgängen, wie sie z.B. in der Atmosphäre oder um und in natürlichen Lebewesen auftreten. Das Jahrhundertproblem der Turbulenz besteht nun dahin, dass es keine generelle und abgeschlossene Modellvorstellung über die Beschaffenheit und Wirkung der Turbulenz gibt, auf deren Grundlage man technisch relevante Strömungen allgemein und gleichzeitig mit überschaubarem Aufwand berechnen kann. Die nach vielen Jahrzehnten der Forschung nunmehr bestehende Theorie der Turbulenz ist leider auch sehr schwierig. Sie stellt die wissenschaftliche Grundlage für erfolgreiche Simulationen turbulenter Strömungen mit Berechnungscodes für spezielle Anwendungen für Naturwissenschaftler und Ingenieure dar.

Wolfgang Schröder verfügt nun über die seltene Gabe, schwierige Theorien wie die der Turbulenz zu durchdringen, sinnvolle Erweiterungen herzuleiten und ihren Nutzen für technische Anwendungen zu ermessen. Er hat sehr früh erkannt, dass in den Berechnungsmethoden zur numerischen Strömungssimulation ein Schlüssel zur Lösung der wesentlichen Fragestellungen der turbulenten Strömungen steckt. Er hat wesentliche Beiträge durch mathematische Modellbildung, durch die Analyse des numerischen Verhaltens seiner Berechnungsvorschriften und auch durch die Erarbeitung und Verifikation anwendungsnaher Berechnungsprogramme geleistet. In der Modellbildung gehören seine Beiträge zu den Störungsdifferentialgleichungen der numerischen Aeroakustik zum anerkannten Stand des Wissens. International anerkannt sind auch seine Methoden in der sogenannten Large Eddy Simulation, mit der turbulenzauflösende Simulationen u.a. in der Flugzeug-Aerodynamik erstmalig berechenbar wurden.

Hochgeschwindigkeitsströmungen weisen besondere Schwierigkeiten auf, da sie neben dem Auftreten der Turbulenz auch noch durch starke Sprünge im Strömungsverhalten, sogenannte Verdichtungsstöße, und nichtlineare Wirkungen der physikalischen Einflussparameter hierauf gekennzeichnet sind. Die Berechnung von Verdichtungsstößen ist wegen der dadurch erzeugten, sehr großen Variation der mechanischen Belastungen auf umströmte Strukturbauteile von Luftfahrzeugen oder bei luftführenden Anlagen sehr bedeutend. Wolfgang Schröder hat wesentliche Phänomene der Wirkungen der Stöße auf wandnahe, viskose Strömungen und der Strömungs-Struktur-Wechselwirkungen erforscht. Damit hat er wichtige Beiträge zu transsonischen Stoßschwingungen an Flugzeugen und zu hypersonischen Problemstellungen der mechanischen Lasten und Wärmelasten an Raumfahrzeugen geleistet.

Eine ganz andere Problemstellung besteht bei aeroakustischen Quellen. Diese beschreiben den durch Strömungen erzeugten Lärm. Ein wichtiges Beispiel ist das von Menschen als dumpf und sehr unangenehm empfundene Geräusch der Triebwerksstrahlen von Flugzeugen. Die wissenschaftliche Durchdringung und Berechnung der aeroakustischen Quellen ist ein besonders schwieriges Unterfangen, da hier wieder sehr unterschiedliche Skalen des Problems und sehr komplexe

physikalische Mechanismen aufgelöst werden müssen. Wolfgang Schröder hat neue Erkenntnisse über die Entstehung und Minderung des durch Turbulenz erzeugten Lärms zu Tage gefördert.

Wolfgang Schröder hat sehr früh erkannt, dass der Fortschritt im Bereich der Strömungssimulation auch neue Perspektiven in der Medizintechnik ermöglicht. Er hat daher Kooperationen mit Medizinern initiiert und damit Lösungen für medizinische Problemstellungen der Atemwege befruchtet. Eines der langfristigen Ziele besteht darin, vor einem medizinischen Eingriff am Strömungsraum der Nase den erwarteten Einfluss auf das Strömungsverhalten zu simulieren und wenn irgend möglich auch zu optimieren. Diese potenziell segensreiche Anwendung der Strömungsmechanik hat Prof. Schröder erstmals erkannt und erfolgreich in koordinierter Forschung bearbeitet.

Wolfgang Schröder hat seine wissenschaftlichen Methoden und Erkenntnisse in zahlreichen Publikationen in den internationalen bedeutendsten Fachzeitschriften seines Fachs öffentlich zugänglich gemacht. Diese Publikationen sind gekennzeichnet durch geradlinige und verständliche Herleitungen, exzellente Ausarbeitungen und tief gehende, numerische und experimentelle Analysen.

Wolfgang Schröder hat sich durch Initiierung und Koordination zahlreicher kooperativer Programme der Grundlagenforschung um das Fortkommen seines Fachs verdient gemacht. In den letzten 10 Jahren hat er zwei Forschergruppen der Deutschen Forschungsgemeinschaft initiiert und geleitet. Die letzte von ihm initiierte DFG Forschergruppe arbeitet an der Reduktion des Reiseflugwiderstands durch aktive Kontrolle der Turbulenz nahe der Flügelkontur.

Wolfgang Schröder war ferner Koordinator eines Sonderforschungsbereichs in Aachen und er hat einen großen Anteil am Zustandekommen eines weiteren, ortsübergreifenden Sonderforschungsbereichs zur Raketentechnik gehabt. Er hat den wissenschaftlichen Nachwuchs durch die Einrichtung einer Graduiertenschule aus Mitteln des Landes NRW sehr befördert.

Wolfgang Schröder ist mir als eine absolut integere Persönlichkeit bekannt. Er setzt sich stets zum Wohl der Wissenschaft ein und schafft mit seinem Handeln gegenseitiges Vertrauen. Wolfgang besitzt einen schönen Sinn für Humor und es ist eine Freude, mit ihm zu sprechen und sich auszutauschen. Wolfgang Schröder ist ein würdiger Träger der Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft des Jahres 2013.

Human Computational Fluid Dynamics: From the Nose Model to the Real Nose*

WOLFGANG SCHRÖDER

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University
Wüllnerstraße 5 A, D-52062 Aachen

The following article summarizes the work that has been performed at the Institute of Aerodynamics since roughly 2005 in the field of biomedical flows, a fantastic area where medicine, biology, and fluid mechanics interact. The focus of the discussion is on nasal cavity flows. It represents an excerpt of the work that has been jointly performed with I. Hörschler, M. Meinke, and A. Lintermann.

I. Introduction

The human nasal cavity must satisfy a variety of functions. Besides respiration it is responsible for moistening, tempering, and cleaning the air. These functions are expected to strongly depend on the complex internal geometry of the nasal cavity. Impaired nasal respiration especially under normal breathing conditions, i.e., in everyday life situations, is a common and widespread disease, which makes nose surgery one of the most often performed operations in the western world. Unfortunately, the success rate, i.e., the number of people having no problems after surgery, is by no means satisfactory. To enhance this situation, it is desired to numerically predict the flow field inside the nose and its relation to geometric changes. This can finally lead to a computer assisted surgery (CAS) tool, that will help on the one hand, to understand the flow in the extremely complex human nasal cavity and on the other hand, to derive criteria how to better predict the outcome and to improve the success of nose operations. This study contains some first steps to reach the long term goal of a rhino-CAS tool.

Before geometric changes of the nasal cavity can be analyzed from a fluid mechanical point of view, two fundamental questions have to be answered. First, in the literature the flow through the human nasal cavity is considered quasi steady due to a very low Strouhal number at normal breathing conditions. However, this assumption has never been thoroughly verified. The question arises whether or not this assumption holds independently from the mass flux or, in other words, from the Reynolds number. Therefore, in section III it will be clarified in which

* Der Vortrag wurde am 26.04.2013 anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille durch die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft gehalten.

Reynolds number range the flow behaves quasi-steady to show when numerically less expensive steady state flow simulations can be performed. Furthermore, the unsteady nasal cavity flow field gives insight in the interesting phase of transition between inspiration and expiration. Second, the findings in the literature give a very unclear picture of the state of the nasal cavity flow. Many research groups consider the flow to be turbulent. Turbulence models are applied that are often invalid for this kind of internal flow. This turbulence assumption is primarily justified by the value of the Reynolds number based on the bulk velocity and the hydraulic diameter which is too rough an indicator for such an intricate internal flow. A comparison with a critical Reynolds number of $Re = 2300$ that indicates the change from laminar to turbulent flow at a pipe with circular cross section can at least be called questionable. Section IV evidences via numerical and experimental findings the flow at normal respiration to be well described by highly resolved laminar simulations.

The aforementioned issues will be addressed in the context of a model geometry of the human nasal cavity. In the next step, in Section V in which the influence of the geometric variation of the nasal cavity will be discussed no more model configurations but real nose geometries will be analyzed and the results with respect to velocity profiles, wall-shear, and heat transfer distributions will be juxtaposed for three human nasal cavities.

In brief, this article possesses the following structure. In the subsequent section, the numerical methods are only sketched. The steady-unsteady and laminar-turbulent issues are discussed in sections III and IV. The impact of geometric variations is analyzed in section V, before some conclusions are drawn in section VI.

II. Numerical Methods

The analyses of the model configurations are performed by a structured finite-volume method to approximately solve the Navier-Stokes equations of a three-dimensional fluid [1]. An explicit five-stage Runge-Kutta method of second-order accuracy is used for temporal integration. The spatial approximation is also of second-order accuracy using an advective upstream splitting method (AUSM) for the inviscid terms and centered discretizations for the remaining differentials. A more detailed description of the solver including the reference values for the non-dimensional Navier-Stokes equations is given in [2].

The flow fields of the real human nasal cavities in section V are simulated by a Lattice-Boltzmann Method (LBM) using the Bhatnagar, Gross, and Krook (BGK) [3] approximation. A detailed derivation of the LBM and an extensive discussion can be found in [4]. The BGK approximation uses a simplified collision term for the Boltzmann equation leading to the so-called BGK equation without external

forcing which contains the collision frequency, the Maxwell equilibrium distribution function, the particle distribution function, and the components of the molecular velocity vector. That is, the temporal change and the propagation term balance the molecular collisions. The corresponding algorithm is based on the iterative computation of propagation and collision process for each cell of the computational grid. The macroscopic flow variables are determined by summation over the base moments of the distribution function.

Since the LBM formulation is based on uniform Cartesian grid, it is highly adapted for parallel computation and it offers an efficient boundary treatment for fixed walls. The computational grid is automatically generated from arbitrary surface by an in-house grid generator [5]. The ability of reproducing variable organic geometries makes this method well suited for biomedical applications. The standard LBM describes weakly compressible flows and it has been shown in the literature [6] that the LBM yields indeed solutions of the Navier-Stokes equations. More details on the LBM can be found in [7, 8].

III. Discussion of the Unsteadiness of the Flow

To closer examine the unsteady behavior of the nose flow, the complete respiration cycle of the flow through the nasal cavity is numerically analyzed. It is the purpose of this discussion to evidence on the one hand, the differences between steady and unsteady flow solutions at low Reynolds number flows and on the other hand, the extremely good agreement between steady and unsteady flows at high Reynolds numbers. In other words, the analysis shows the steady flow condition to be a valid assumption especially in the high Reynolds number range. Details of the flow fields such as vortices, recirculation regions, and so forth were discussed in [2]. The findings, which address the question whether it is justified to assume the nose flow to be steady and if so, in what Reynolds number range this assumption is justified, are stressed and for this reason the discussion focuses on the macroscopic differences between the flow fields. That is, the comparison of the steady and unsteady solutions is based on juxtaposing pressure loss and wall-shear stress distributions.

III.1. Numerical Setup

III.1.1. Geometry and Mesh

From the data by Masing [9] an anatomically correct replica model with inferior and middle turbinate is constructed. As the superior turbinate is often vestigial in the average human nasal passage it is neglected in this study. That is, we will refer to the anatomical center turbinate as upper turbinate and the inferior turbinate will

be denoted as lower turbinate. The geometry of the nasal cavity model includes besides lower and upper turbinate also cartilage spurs. These are illustrated in the left part of Fig. 1 where the plane section of the septum is not shown to evidence the spurs above the lower and center passage of the cavity.

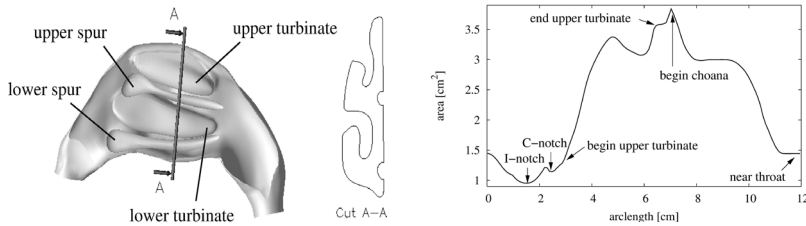


Fig.1: Nasal cavity geometry and coronal cross section (left) and cross section area distribution (right).

Fig. 1 also shows a coronal cross section (left) and an area plot (right) constructed from cross sections normal to a geometrical center line through the cavity. The minimum cross section area is found at the so-called isthmus nasi (I-notch), which is the nasal valve region. The concha notch (C-notch) marks the beginning of the lower turbinate. For normal patients like in the case considered in this study the I-notch is smaller than the C-notch, this is called climbing W. In the case of e.g. an allergic rhinitis the C-notch could have a lower cross section area than the I-notch. Such a distribution of the cross sections would be called descending W [10]. Leading and trailing edge of the upper turbinate are marked separately in the area plot and the beginning of the choana is at the end of the lower turbinate. The area plot evidences the sudden expansion starting at the C-notch.

The grid generation is described at length in [2]. The physical model was scanned using a computer tomograph [11] to obtain an unstructured surface representation by the marching cube algorithm applied to the CT data. The model surface is subdivided into its main components, which are the cartilage spurs at the septum and the turbinates to simplify the grid generation. The resulting structured multiblock grid consists of 32 blocks and a total number of 300,000 cells.

III.1.2. Steady State Boundary Conditions

A no-slip isothermal condition with $T_{\text{wall}} = T_{\infty}$ and a zero pressure gradient normal to the wall are imposed on the wall. Assuming a Strouhal number much smaller than one steady state boundary conditions can be applied at normal respiration. Taking the one-dimensional energy equation for compressible, isentropic flow at the inlet the speed of an isentropic expansion from steady state is given by

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \frac{\bar{p}_0}{\bar{\rho}_0} \left[1 - \left(\frac{\bar{p}}{\bar{p}_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad (1)$$

The subscript 0 denotes the stagnation state and the quantity $\kappa = 1.4$ is the ratio of specific heats c_p/c_v for air. This equation is the so-called Saint-Venant/Wanzel equation. Introducing the stagnation state as reference

$$p = \frac{\bar{p}}{\bar{p}_0}, \quad w = \frac{\bar{w}}{\bar{u}_0}, \quad \rho = \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_0} \quad (2)$$

and using the ideal gas law equation (1) determines the static pressure at a given expansion velocity

$$p_{new} = \left[1 - \frac{\kappa - 1}{2} p_{old}^{\frac{2}{\kappa}} (\rho w)^2 \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}. \quad (3)$$

Equation (3) can be used at the inflow boundary to iteratively compute the static pressure p_{new} at a new time step from the given value of ρw and the pressure value p_{old} from the previous time step. Note that the quantity ρw is an integral value for the inflow cross section such that the actual velocity distribution for the new time step has to be prescribed as an additional condition, i.e., by assuming a fully developed flow.

On the outflow boundary the static pressure level p_∞ is imposed in conjunction with a nonreflecting boundary condition formulation based on a sponge layer [12].

III.1.3. Unsteady Boundary Conditions

It goes without saying that the conditions on the wall, i.e., no-slip, isothermal, and zero normal pressure gradient, still hold in time-dependent flows. To mimic the unsteady flow of the human respiration cycle consider the model sketched in Fig. 2. Inspiration is understood as an isentropic expansion from a steady ambient state with stagnation pressure p_a for the inflow boundary at the nostril. Unlike the discussion in section III.1.2. the outflow boundary, i.e., the boundary just upstream the throat, possesses a time dependent static pressure $p(t) \leq p_a = p_\infty$.

At expiration the outflow and inflow boundaries are exchanged. That is, at expiration the throat boundary is the inflow boundary. An isentropic expansion from a steady state is generated through a time dependent stagnation pressure $p_0(t) \geq p_a$ in the throat, whereas a constant pressure $p_\infty = p_a$ is at the nostril.

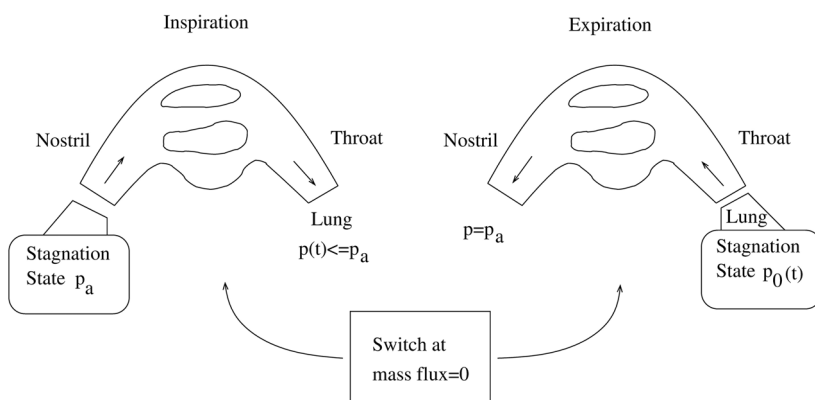


Fig. 2: Scheme for human respiration cycle.

The switching criterion between the inspiration and the expiration phase plays an essential role in the simulation. A possible solution is to switch according to the mass flux

$$\begin{aligned}
 0 < |\dot{m}| &\leq \Delta \dot{m} \\
 \Delta \dot{m}_{in \text{ to } ex} &= 1.0842\% \cdot \dot{m}_{max.in} \\
 \Delta \dot{m}_{ex \text{ to } in} &= 0.5934\% \cdot \dot{m}_{max.ex}
 \end{aligned} \tag{4}$$

where $\Delta \dot{m}$ has to be sufficiently small to ensure a smooth and continuous pressure and mass flux change over time during the switching process. Depending on the time step of the flow solver the mass flux also changes discretely. This additionally requires $\Delta \dot{m}$ to be larger than the discrete mass flux when the zero mass flux state is approached to smoothly initialize the switch. The chosen values for $\Delta \dot{m}$ in this study are given in equation (4). Note that they are different for the transition from inspiration to expiration and vice versa, since the maximum mass fluxes of each phase are different. The shape of the mass flux as a function of time depends on the imposed shape of the pressure distribution over time. Following [13] the unsteady nose respiration has been approximated by a sinusoidal pressure function in this study. Fig. 3 shows the static pressure distributions at the nostril and throat boundary and in addition the mass flux as a function of time. At inspiration the static pressure at the nostril decreases due to the increasing flow velocity, at expiration the fluid flows against the constant pressure p_1 of the ambience. The static pressure on the throat boundary is sinusoidal like the prescribed stagnation pressure. The mass flux follows the throat stagnation pressure with a slight time delay, i.e., a small phase shift can be observed when the extrema are juxtaposed.

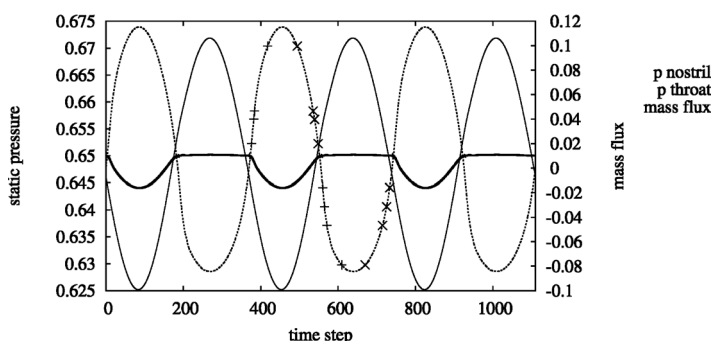


Fig. 3: Static pressure at nostril and throat boundary and mass flux; the symbols represent the time levels $t_1(+)$ and $t_2(\times)$ at various Reynolds numbers and mass fluxes respectively.

Note that the maximum mass flux for expiration is lower than that for inspiration which is due to the slower but longer expiration phase at normal breathing conditions.

III.2. Results

The analysis starts by summarizing the main parameters of the steady and unsteady flows to be discussed. Then, a comparison of the total pressure loss over the mass flux of steady state and unsteady results is presented. Next, the skin-friction distribution will be investigated.

The Reynolds numbers and volume fluxes for the steady state simulations of inspiration and expiration are listed in Tab.1 and are based on average normal breathing conditions. It is assumed that the respiratory volume flux is twice that of the single nasal cavity, which is valid for symmetric nasal cavities. The reference length of the Reynolds number is based on the hydraulic diameter $d_h = 4A/U = 13.6$ mm of the throat, where A represents the area of the cross section and U is the circumference of A . The unsteady flow simulation covers a Reynolds number range $0 \leq Re \leq 2900$ for inspiration and $0 \leq Re \leq 2120$ for expiration. The Strouhal number is $S_r = 0.791$, which emphasizes the unsteady effects and therefore can be deemed a worst-case estimate to check the validity of the steady state assumption. Three respiration cycle periods were simulated. The first period is skipped because of its dependence on the imposed initial flow condition. The second and third period did not show any difference, which is why the further analysis is based on the second period.

In Fig. 4 the unsteady pressure loss as a function of mass flux is presented by the thick solid line. The pressure loss is defined as

$$p_{loss} = \left(p + \frac{\rho}{2}w^2\right)_{nostril} - \left(p + \frac{\rho}{2}w^2\right)_{throat} \quad (5)$$

which permits a smooth curve and yields a negative pressure loss at expiration.

Fig. 4 (left) clearly shows a hysteresis in the pressure loss. The area between the upper and lower curve can be interpreted as power loss of the respiration cycle. The expiration phase possesses a higher pressure loss at large mass fluxes than the inspiration phase. The thin solid line represents a Bezier fit of the averaged unsteady pressure loss over the mass flux. The shape of this line is in good qualitative agreement with the pressure curves presented in [14]. The results of steady state flows at several Reynolds numbers are given by the crosses. It is evident that there is an excellent agreement between the averaged unsteady and the steady state results. This makes sense since the steady state represents a Strouhal number limit of zero in which case the unsteady thick solid line will approximate the thin solid curve of the Bezier fit. The lower the Strouhal number the less hysteresis will occur. Also note that when the mass flux decreases in the inspiration and expiration phase the unsteady results are closer to the steady state solution. This observation will be confirmed by the following discussion.

Re	\dot{q}_{single} (ml/s)	$\dot{q}_{respiration}$ (ml/s)	$\dot{q}_{respiration}$ (ml/min)	state
500	79.6	159.2	9.6	inspiration
1000	159.2	318.3	19.1	
1170	186.2	372.4	22.4	
2500	397.9	795.8	47.8	
400	63.7	127.3	7.6	expiration
790	125.7	251.5	15.1	
1170	186.2	372.4	22.4	
1980	315.1	630.3	37.8	

Table 1: Reynolds numbers and volume fluxes for steady state simulations.

Fig. 4 (right) shows distributions of the static pressure vs. mass flux based on rhinomanometry measurements [15]. A pipe-shaped nose model having a diameter of $d = 6$ mm and a length of $l = 100$ mm is used at 44 and 88 respiration cycles per minute. The lower respiration frequency is illustrated in quadrant I and III and the higher frequency in quadrant II and IV. The measurements confirm two major results discussed above. First, the shape of the distribution visualizing the

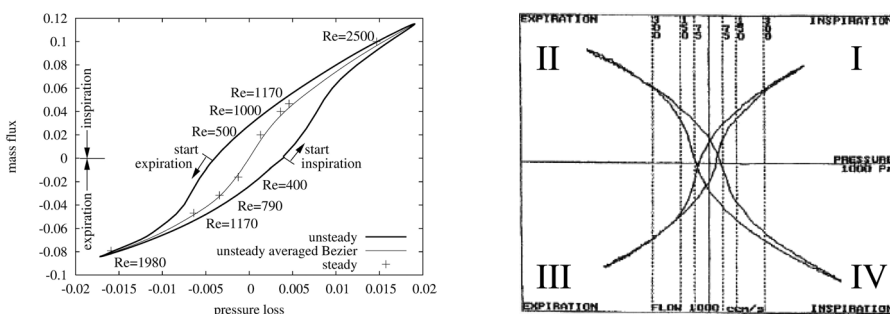


Fig. 4: Pressure loss vs. mass flux, comparison of steady state and unsteady results (left). Note due to the pressure loss definition given by Eqn. (5) negative pressure loss values can occur. Rhinomanometry measurement of static pressure vs. mass flux of a pipe-shaped nose model [15](right).

fact that at high Reynolds numbers or in other words, at high mass fluxes the nasal cavity flow can be assumed steady. Second, the tendency to reduce the hysteresis at lower frequencies. This trend has been described above when the steady state simulations have been discussed.

The further analysis is based on comparisons of $Re = 500$, $Re = 1170$ at inspiration and $Re = 400$, $Re = 1170$ at expiration. The results for $Re = 1000$ and $Re = 790$ are similar to those at $Re = 1170$ which is why they are skipped in this analysis. At $Re = 2500$ and $Re = 1800$ steady and unsteady flow results coincide since there is hardly any hysteresis at such high mass fluxes. Therefore, these results are not addressed in the following discussion. Due to the hysteresis the steady state results are compared with unsteady findings having the equivalent intermediate Reynolds number. To enable a direct comparison analogous scales are used for the steady and unsteady results.

In the following, the wall shear stress, i.e., the skin-friction distributions are compared. This quantity can be considered to indicate through high values areas endangered of dryness of the mucosa. All solutions presented in Figs 5 and 6 possess high wall shear stress in the region of the nasal valve and the tip of the lower turbinate and lower septum spur. In other words, the flow in the sudden expansion area at the nasal valve does not strongly depend on the temporal changes of the respiration cycle. This is different when the entire surface is considered. At inspiration an area of high skin friction can be observed on the upper turbinate. The extent of this area undergoes a large variation from covering the complete lower edge at the steady state solution $Re = 1170$ and the distribution for the unsteady computation $Re(t_2) = 1170$ to the non-existence of this area for the unsteady solution at the increasing mass flux $Re(t_1) = 500$. Furthermore, there is also high wall shear stress in the olfactory region for the steady and unsteady

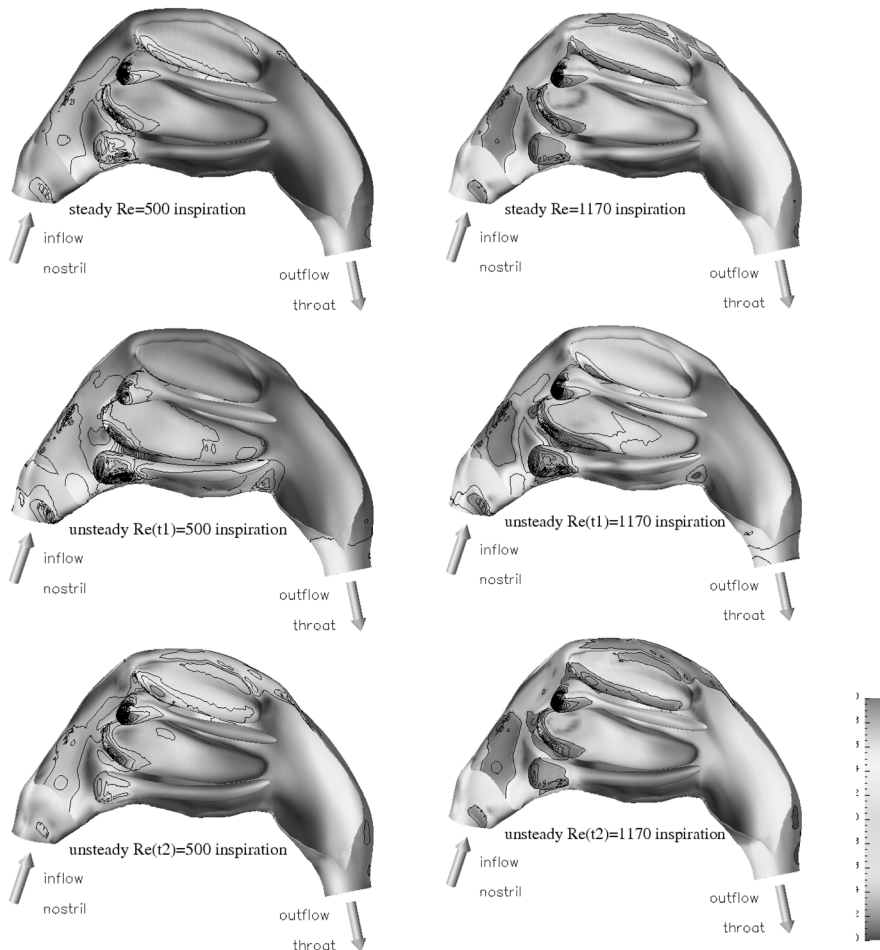


Fig. 5: At $Re = 500$ (left) and $Re = 1170$ (right) wall-shear stress distributions are compared for steady and unsteady flows at inspiration.

solutions at $Re = 1170$, $Re(t_2) = 1170$, and $Re(t_2) = 500$. Again, the best match occurs between the steady $Re = 1170$ and the unsteady $Re(t_2) = 1170$ solutions, whereas the worst match is obtained for the steady and unsteady solutions, i.e., at $Re = 500$ and $Re(t_1) = 500$. At expiration shown in Fig. 6 the area of high skin friction on the lower edge of the upper turbinate is not observed. It is interesting to note that the overall resemblance of the wall shear stress distributions between the steady state and unsteady results is definitely better for the expiration than for

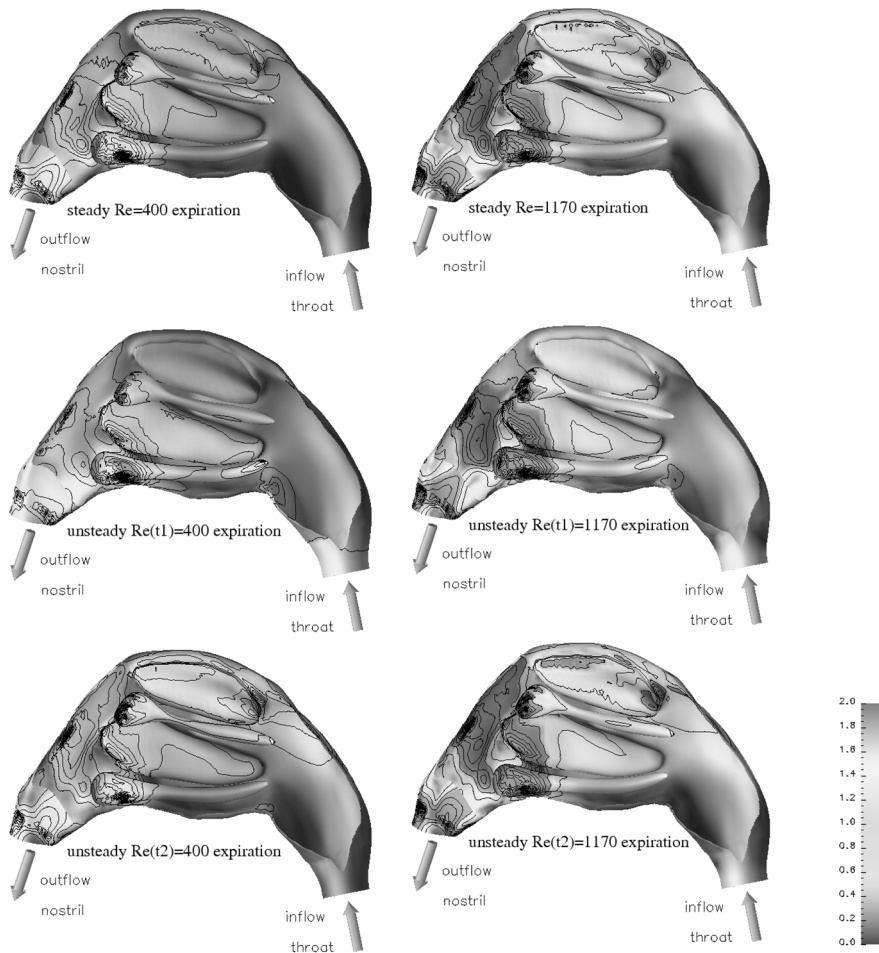


Fig. 6: At $Re = 400$ (left) and $Re = 1170$ (right) wall-shear stress distributions are compared for steady and unsteady flows at expiration.

the inspiration phase. That is, the near-wall flow field seems to be less susceptible to cyclic changes at expiration than inspiration.

In brief, a detailed analysis of the unsteady respiration cycle through a model of the human nasal cavity was performed at $Sr = 0.791$. The comparison of the steady state and unsteady solutions showed the major differences to occur at increasing mass flux. At decreasing mass flux only small discrepancies between the steady and unsteady findings were observed. Near transition between inspiration

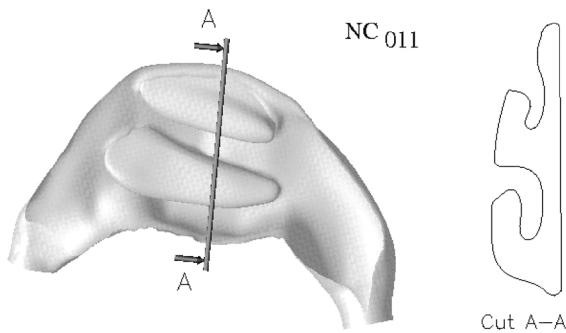


Fig. 7: Model of the nasal cavity with upper and lower turbinate.

and expiration, i.e., at small mass fluxes the unsteady results are fundamentally different from the steady state solutions. However, at high mass fluxes the characteristic features of the nasal cavity flows are well captured by the steady state solutions. From this analysis it could be stated as a rule-of-thumb that at $Sr \approx 0.8$ it is appropriate to assume the nasal cavity flow to be steady if the Reynolds number satisfies $Re > 800$.

IV. Discussion of the Flow State

Most of the investigations published in the literature are performed under the assumption that the flow in the human nasal cavity is turbulent. Considering, however, the variation of the geometry of the nasal cavity this assumption is quite brute force. It is more likely that a locally intermittent flow state exists or a well-resolved laminar flow captures the essential flow physics. To show the relevance of this statement, we compare experimental and numerical results for a model geometry which is illustrated in Fig. 7. The numerical method is based on the aforementioned structured finite-volume flow solver. The boundary conditions were also discussed above. Before the discussion of the results, the experimental setup will be described.

IV.1. Experimental Method

To measure the velocity distribution the method of Digital Particle-Image Velocimetry (DPIV) is used. The application of this optical method requires a fully unobstructed view into the inner flow region, i.e., a completely transparent model of the nasal cavity and an appropriate fluid with the same optical refractive

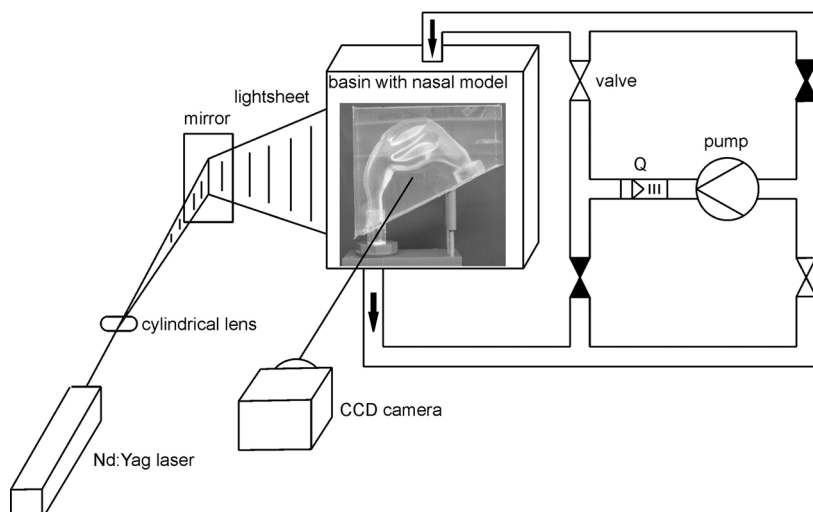


Fig. 8: Principal sketch of the DPIV setup and the optical arrangement for measurements in sagittal planes parallel to the septum.

index as the material of the model. In previous studies we used a model made of epoxy-based cast resin and the fluid tetraline [16]. Due to the complex handling of tetraline and the relatively high refractive index of epoxy-based resin, we apply an alternative method described by Hopkins et al. [17], i.e., we use a rapid-prototyping process to manufacture a nose model made of silicone.

Owing to the small size and complex geometry of the human nasal cavity a 1.5-scaled model was built. The geometry was taken from the previously described CT-scans and stored as an STL data file. This is a common format for machining tools or rapid prototyping and it describes the 3-D surface as an unstructured grid. From these data a “negative” kernel of the nasal passage is generated with rapid prototyping. The material is a water soluble cornstarch, which is glued layer by layer in a 3-D printing device. The corresponding positive is obtained by casting the kernel in a transparent silicone block. After curing the kernel is washed out yielding a silicone block with the nasal passage as internal flow geometry.

The model is placed within a flow loop with water/glycerol as carrier medium (Fig. 8). The complete model is fully immersed within a squared basin made of acrylic glass to which the inflow and outflow devices are connected. The inlet of the nostril region possesses the shape of a smooth nozzle being connected to the container box. The flow through the nasal cavity exits into the throat, which is simulated by a long straight pipe. The refractive index of the silicone matches that of a volume ratio mixture of glycerol to water of 55%. The mass flow rate

is adapted to the characteristic air flow parameters in the nose by keeping the Reynolds number constant. Inspiration and expiration are produced by changing the flow direction in the pipe system.

The hydrogen bubble technique is used to produce fine air bubbles as tracer particles, which are recorded by the CCD camera to visualize and quantitatively measure the flow. For the DPIV measurements the fluid is illuminated in planar laser light sheets generated by a double pulse Nd:YAG laser. The light sheets are arranged in sagittal planes parallel to the septum and in coronal cross-sections of the nasal passage. The 20 sagittal planes are 1 mm apart and 10 coronal planes cover the flow between the nostril and the throat. All measurements are taken with a single DPIV camera. Since this study focuses on the investigation of the mean flow behavior, i.e., the mean velocity profiles and complex flow patterns such as vortex structures or separation areas, the results are based on an average of 50 DPIV recordings.

IV.2. Results

At inspiration and expiration we assume volume fluxes for respiration at rest of 159.15 ml/sec and 127.32 ml/sec that result in Reynolds numbers of $Re = 500$ and $Re = 400$, respectively. Note that in this study the mean Reynolds number based on the mean channel width for the highest considered volume flux of 318.31 ml/sec is in the range of 1030 to 1400 for all configurations investigated, which is why the flow in the numerical analysis is conjectured laminar. The reference length for the Reynolds number is based on the hydraulic diameter of the throat. Furthermore, as aforementioned the flow can be considered steady since the Strouhal number is much smaller than one.

In Figs 10–13 numerical and experimental findings are juxtaposed at inspiration and expiration. For comparison reasons all results are interpolated on equidistant orthogonal grids. The locations of the four selected sagittal and coronal cross sections are indicated in Fig. 9. The cross sections were chosen such that they are in areas, where highly susceptible flow features, e.g., jet-wall interactions, single and double vortices, occur to make the experimental and numerical comparison more reliable. In Fig. 10 cross section 1 shows the flow over the lower and upper turbinate at inspiration. Upstream of the upper turbinate a small vortex-like structure occurs, which is detected by the simulations and the experiments. The cross sections 2–4 in Fig. 10 present mainly the deflection of the flow by the lower and upper turbinate. A closer look reveals a good agreement as far as the angle and the magnitude of the velocity vectors are concerned. Fig. 11 contains the velocity distribution at expiration. The visualization in cross section 1, which shows the flow field between the septum and the turbinates, evidences the same overall flow orientation in the computed and the measured distributions. The cross

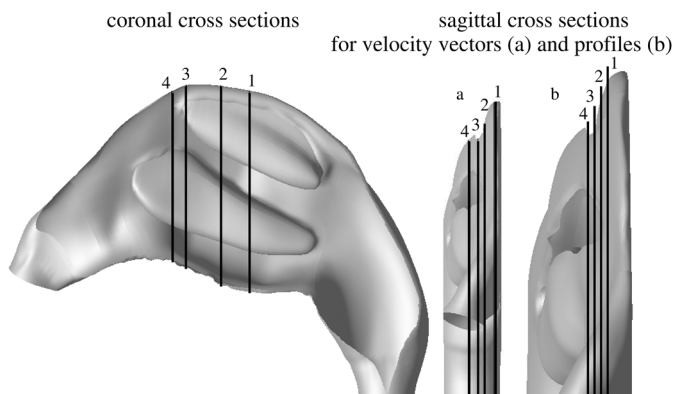


Fig. 9: Positions of coronal (left) and sagittal (center and right) cross sections.

sections 2–4 exhibit a jet-like flow downstream of the throat that interacts with the outer boundary of the nasal cavity upstream of the upper turbinate. The flow structure in the vicinity of the interaction area does coincide in the numerical and the experimental findings. The same statement holds when the flow in the channel between the upper and lower turbinate, below the lower turbinate, and in the area downstream of the lower turbinate and upstream of the nostril are considered. Therefore, it is fair to conclude, that a convincing experimental and numerical agreement is proven by the velocity distributions in the sagittal cross section in Figs 10, 11. Furthermore, the comparison of Figs 10, 11 emphasizes the mixing character of the flow at inspiration and the jet-like character at expiration.

In Figs 12, 13 the velocity distributions at inspiration and expiration in several coronal sections are shown, where cross section 1 is closest to the throat and cross section 4 is nearest the nostril region (Fig. 9). In Fig. 12 there is a double vortex structure visible between the lower and upper turbinate in cross sections 1 and 2. The qualitative agreement between the computations and measurements is definitely good in the cross section near the throat. A slight discrepancy occurs in cross section 4 since the vortex structure above the lower turbinate is not observed before cross section 3 in the experiments whereas the numerical analysis reveals such a vortical structure already in cross section 4. When the less intricate flow region below the lower turbinate is considered, again a satisfactory correspondence between numerics and measurements is visualized. At expiration a strong flow from the region between the upper and lower turbinate through the area between the lower turbinate and the septum is evidenced in cross sections 1 and 2 in Fig. 13. Closer to the nostril, i.e., in cross sections 3 and 4, a converging flow structure with a separation line on the septum is determined in almost the same location in the numerical and experimental findings.

To summarize, the results in Figs 10, 11, 12, and 13 show the good agreement of the computations and the measurements in the sagittal and coronal cross sections and prove the numerical method and the laminar flow assumption to yield the proper description of the overall flow structure.

V. Comparison of the Flow Fields of Three Real Noses

It goes without saying for any useful computed aided surgery (CAS) concept it is a must that real human geometries, e.g., nasal cavities, can be numerically represented and that the flow field can be simulated at such an accuracy that the essential differences which are due to the flow parameters and the geometric intricacy can be resolved. To show that these prerequisites for a promising CAS approach are satisfied an analysis of the flow field of three different nasal cavities is given next.

The numerical method is based on a Lattice-Boltzmann formulation that was briefly sketched in section II. The boundary conditions are similar to those discussed in the beginning of section III.

The three geometries, i.e., the nasal cavities, are labeled good, medium, and poor (N_g , N_m , N_p). This classification is based on a personal evaluation of the patient, who filled out a questionnaire related to his respiration impression, and a validation by rhinologists. More details on the geometries, the numerical method, the mesh, and the postprocessing of the data can be found in [18].

The discussion of the results will focus on the vortical flow structures, the wall shear stress, and the heat flux distribution. Further findings are discussed in [18]. Note that only the steady inhalation has been simulated.

V.1. Results

V.1.1. Vortical Flow Structures

To analyze the mixing process in the various geometries the vortical flow structures will be discussed. First, a thorough investigation is presented for the good nasal cavity N_m , which shows a production of unsteady frequently shed secondary flow structures in the wake region of the turbinates. Then, the less pronounced flow structures in the poor and good geometries N_p and N_g are described.

It is clear from the illustration shown in Fig. 14b that in the configuration N_m the flow is accelerated near the nostrils in the nasal valve. This phenomenon is due to the converging channel in this region and was also observed in [19, 20]. Upstream of the swollen turbinates the flow is homogeneously distributed in the left and right cavity. In the left cavity the flow is split by the lower turbinate. Partially, the fluid is directed through the small lower channel, which causes a local

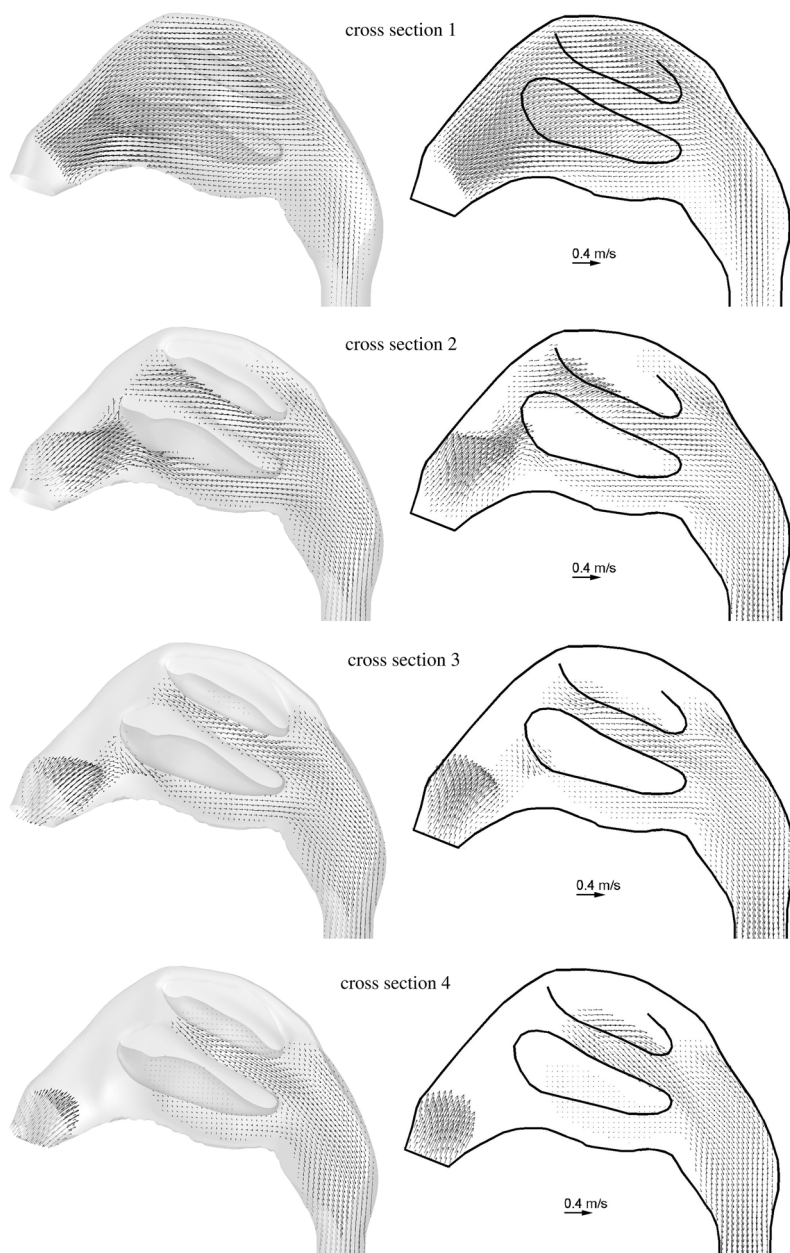


Fig. 10: Velocity field in several sagittal cross sections at inspiration ($Re = 500$); comparison of numerical (left) and experimental (right) results.

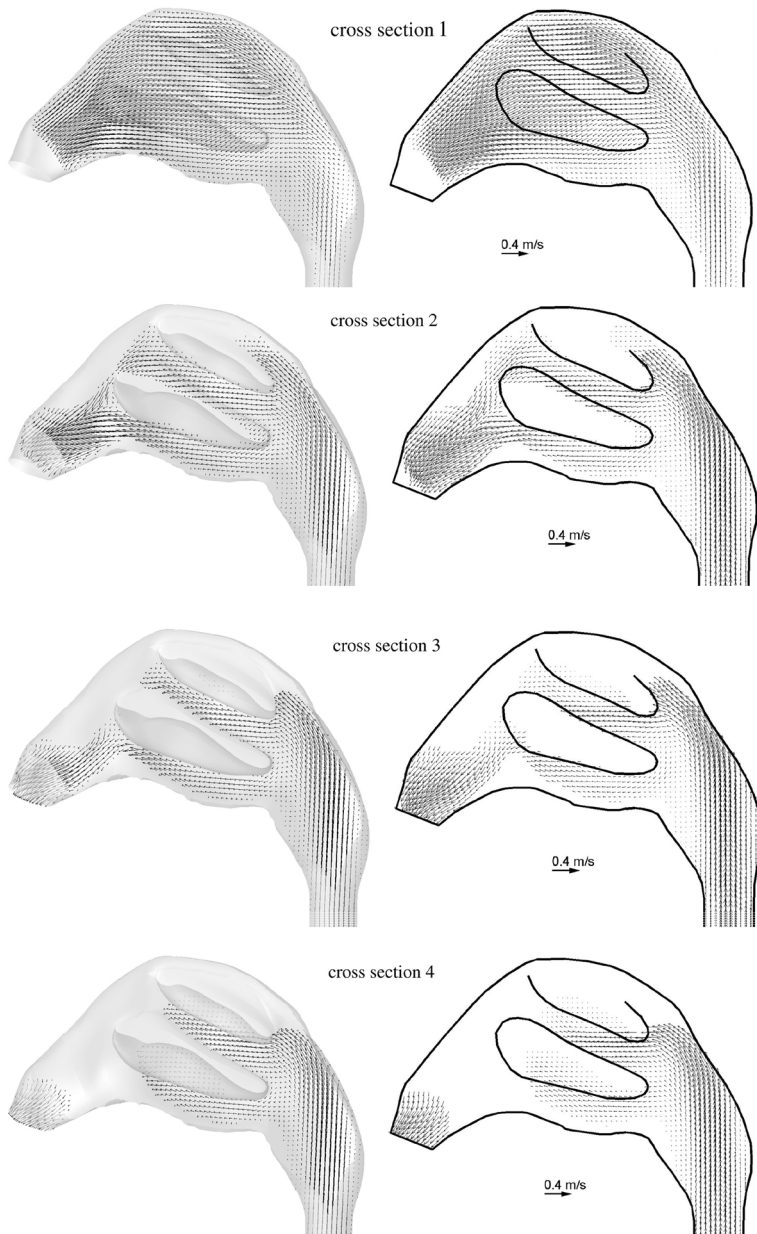


Fig. 11: Velocity field in several sagittal cross sections at expiration ($Re = 400$); comparison of numerical (left) and experimental (right) results.

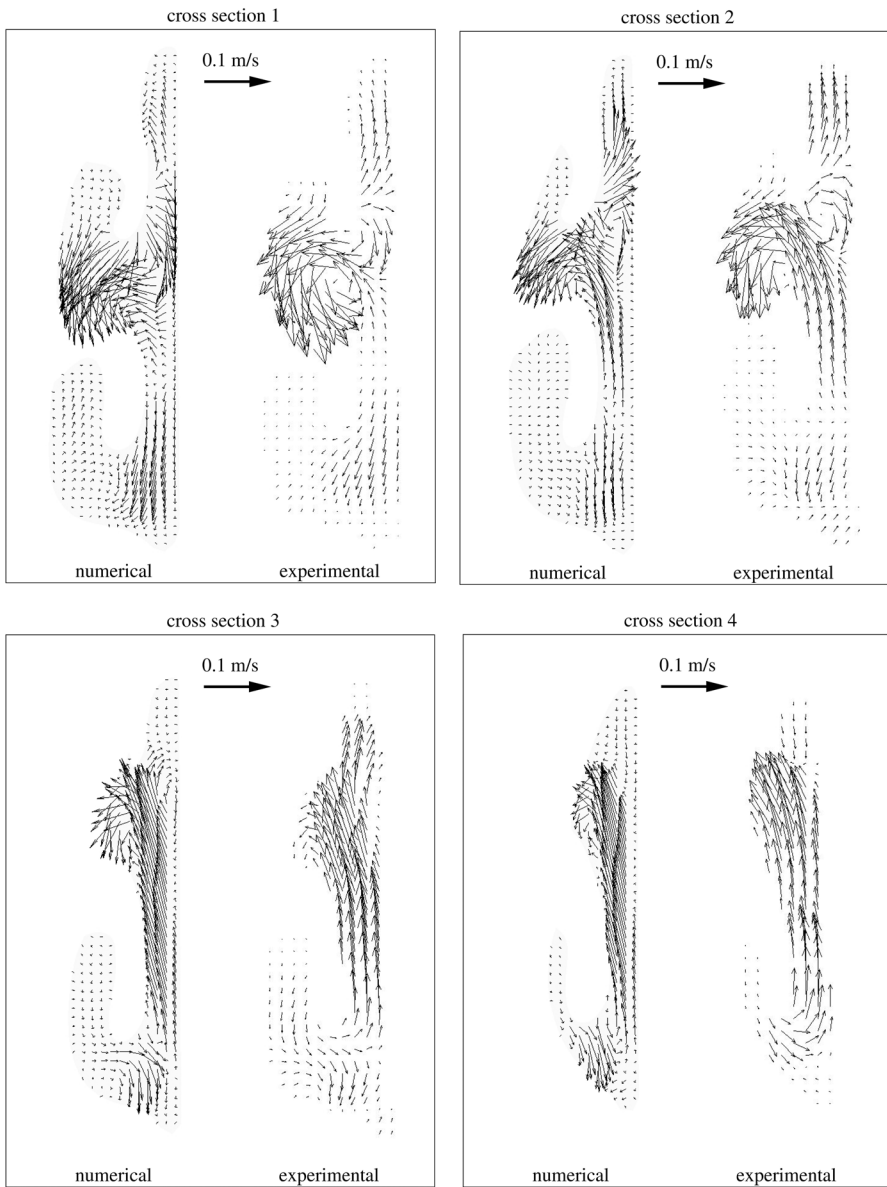


Fig. 12: Velocity field in several coronal cross sections at inspiration (Re = 500); comparison of numerical (left) and experimental (right) results.

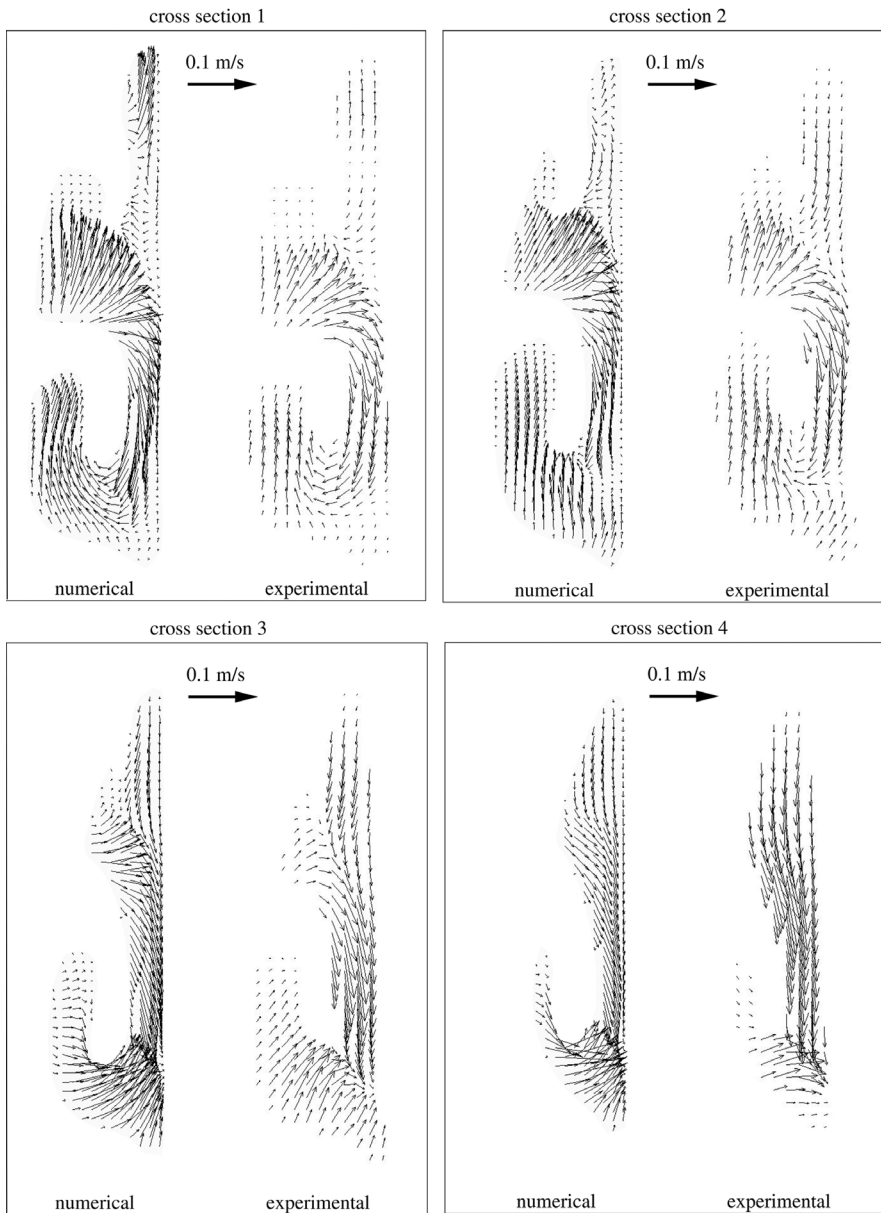


Fig. 13: Velocity field in several coronal cross sections at expiration ($Re = 400$); comparison of numerical (left) and experimental (right) results.

velocity increase. The fluid exits the turbinate channels in a region dominated by mixing jets, which causes the production of unsteady frequently shed secondary flow structures.

The streamlines colored by the velocity magnitude in Fig. 14c evidence the major impact of the missing left center turbinate in the nasal cavity N_p on the overall flow structure. The flow is accelerated near the nostril in the nasal valve and directly guided towards the back of the nasal cavity. The flow performs a clockwise rotation about the streamwise axis before forming a recirculation zone caused by the interaction with the backwall of the cavity. Most of the fluid is deflected towards the pharynx, where the left and right cavity merge. Due to the geometric shape, the flow rotates about the streamwise axis. The side views show the fluid to enter the paranasal sinus and to form a vortex in this region. The part of the fluid in the nasal cavity is accelerated by the converging channel in the pharynx. The septum perforation causes a direct interaction of the flow fields in the left and the right cavity in the region of the missing lower turbinate, where a slowly tumbling recirculation zone is formed (Fig. 14c).

A comparison of the streamlines colored by the velocity magnitude in the side views of the configuration N_g in Fig. 14a shows the flow in the left cavity to be uniformly distributed, whereas the major flux in the right cavity is located in the region of the lower and center turbinate. The homogeneous distribution of the flow in the entire left cavity is based on the low velocity, which increases at the end of the turbinates. Unlike the streamwise velocity gradient in N_p and N_m the acceleration of the fluid into the pharynx is small.

V.1.2. Wall-Shear Stress

Fig. 15 shows the dimensionless wall-shear stress distributions $\tau_w = \bar{\tau}_w / \bar{\tau}_{w,\lambda}^{max}$ of the configurations N_g , N_m , and N_p . Note that for better visualization, the paranasal sinuses are removed. The comparison evidences the N_g configuration to have a smoother distribution than the configurations N_m and N_p . That is, only some local maxima are observed in regions of converging channels, i.e., in the left nasal cavity close to the nostril and in both cavities upstream of the pharynx entrance.

The N_m configuration is dominated by regions of high wall-shear stress τ_w . The overall smaller channel width leads to a higher mean flow at a comparable mass flux resulting in a higher wall shear. The smaller cross section close to the nostrils also leads to a local maximum. The strong septum deviation and the swollen lower turbinate result in high wall-shear stress in the right nasal cavity. In the left cavity, the fluid impinges upon the lower turbinate resulting in a local maximum. The major increase occurs in the pharynx, where the flow from both sides merges into a mixing zone. The highest shear stress is reached at the back of the pharynx, where the fluid is guided downstream to the larynx.

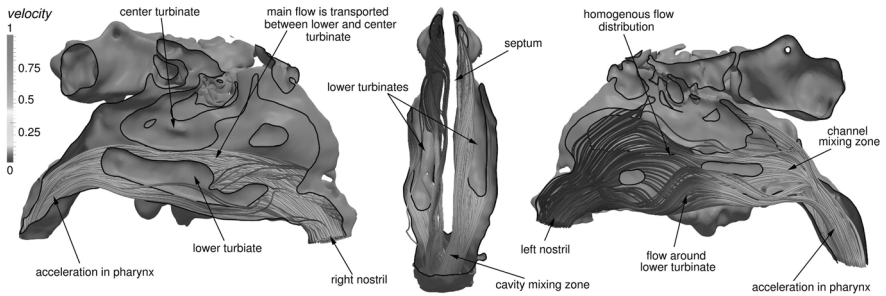
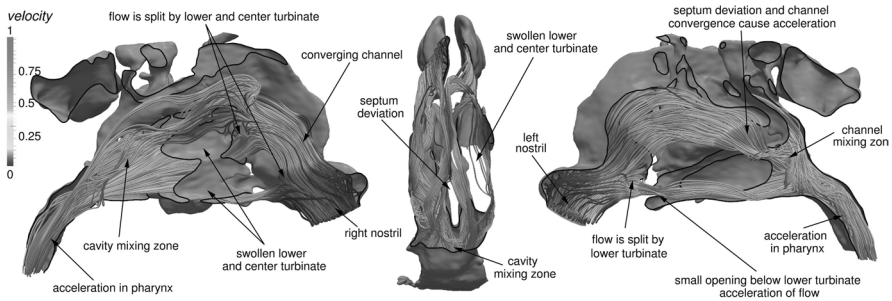
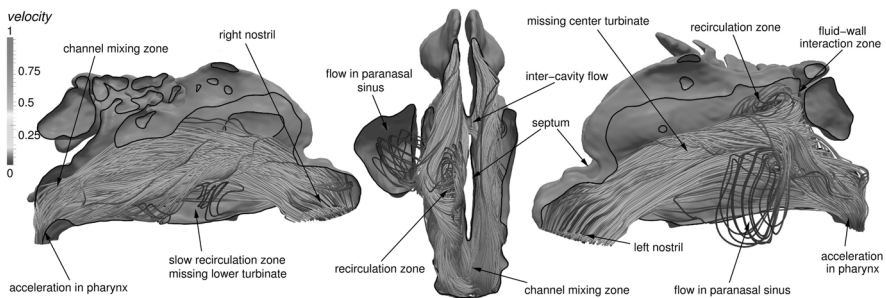
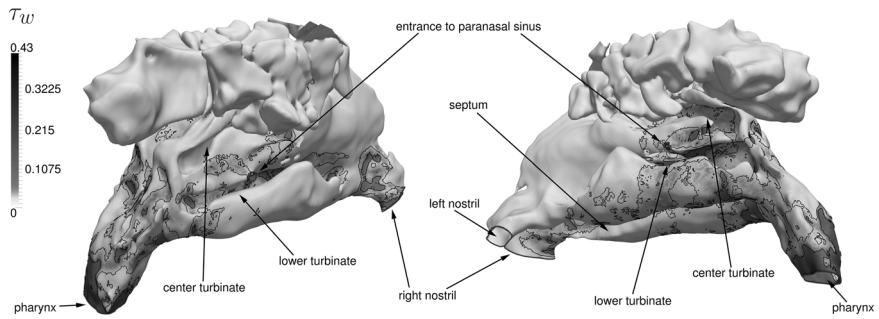
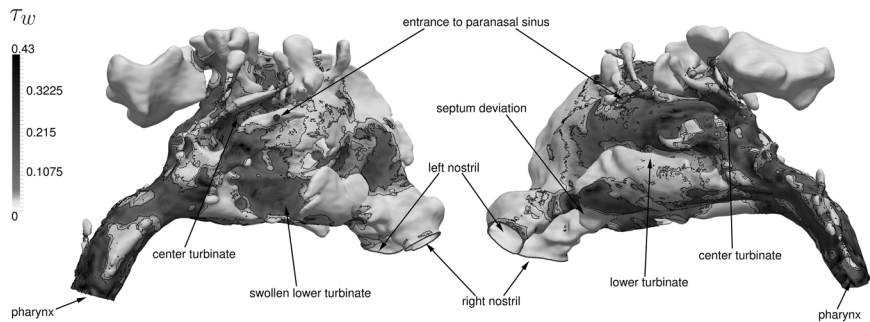
a) Streamlines in the nasal cavities N_g .b) Streamlines in the nasal cavities N_m .c) Streamlines in the nasal cavities N_p .

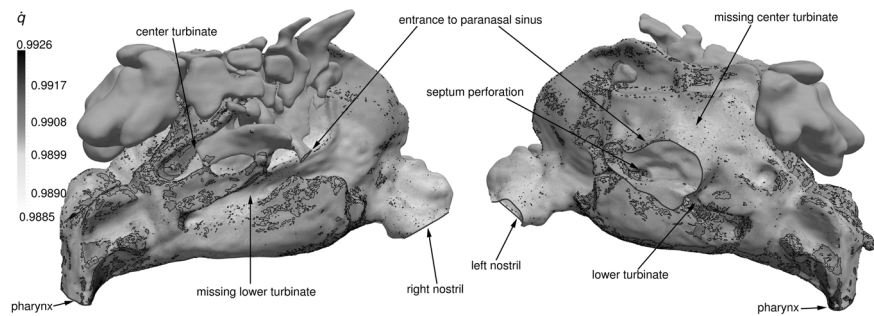
Fig. 14: Streamlines in the nasal cavities N_g , N_m , and N_p colored by the velocity magnitude $v_r = \bar{v}/\bar{v}_{max}$, where $\bar{v}_{max} = 6.5$ m/s the maximum dimensional velocity of all configurations. Side views (left and right column) and top views (center column) of the three-dimensional geometries are shown.



a) Wall-shear stress distribution τ_w in the nasal cavity configurations N_g .



b) Wall-shear stress distribution τ_w in the nasal cavity configurations N_m .



c) Wall-shear stress distribution τ_w in the nasal cavity configurations N_p .

Fig. 15: Wall-shear stress distribution τ_w of the various nasal cavity configurations N_g , N_m , and N_p . The paranasal sinuses were removed for better visualization.

Like N_g and N_m the configuration N_p also possesses local maxima near the nostrils. In the left nasal cavity the fluid interacts with the outer backwall causing the increased wall-shear stress downstream of the large orifice to the paranasal sinus. This flow behavior occurs since the center turbinate is removed and the fluid is directed against the nasal cavity wall. The septum perforation experiences an increased τ_w due to the mass flow from the left to the right nasal cavity. In the right nasal cavity the fluid enters a converging channel in the region of the center turbinate, which is why this region is dominated by increased wall-shear stress. Downstream of the turbinates a ring of high τ_w is formed due to the converging-diverging channel geometry. However, the highest wall-shear stress is again determined further downstream in the pharynx.

V.1.3. Heating Capability

To complement the evaluation of the respiration efficiency of the nasal cavities the dimensionless heat flux distribution for the three configurations N_g , N_m , and N_p is shown in Fig. 16. Note that \dot{q} is normalized by its maximum over all configurations \dot{q}_{\max} . The juxtaposition of the distributions shows that the heat flux is best in the sense of smoothly increasing in configuration N_g (Fig. 16a). Especially in the right nasal cavity, \dot{q} continuously increases along the streamwise direction. In contrast to the left side \dot{q} is almost equally distributed between the turbinate channels. The major heat flux occurs in the retral part of the turbinate channels and the pharynx.

The distribution in configuration N_m in Fig. 16b is dominated by local maxima in the retral part of the turbinate channels. A smooth distribution is determined in the lower turbinate channel of the left nasal cavity in the channel mixing zone of the right cavity, and in the pharynx region. However, the overall \dot{q} distribution is decreased compared to configuration N_g . The low heat flux distribution of configuration N_p in Fig. 16c emphasizes the low heating capability of this nasal cavity.

VI. Conclusion

The fluid mechanics of model and real nasal cavities has been numerically analyzed by a finite-volume and a Lattice-Boltzmann method. It has been the flow physics not the numerics that has defined the core of the discussion.

First, the flow through a model has been analyzed at a Strouhal number $Sr = 0.791$ for the complete unsteady respiration cycle. For validation purposes the findings have been compared with steady state solutions for inspiration and expiration. From the comparison of the steady state and unsteady solutions it can be stated as a rule-of-thumb that at $Sr \approx 0.8$ it is appropriate to assume the nasal cavity flow to be steady if the Reynolds number satisfies $Re > 800$.

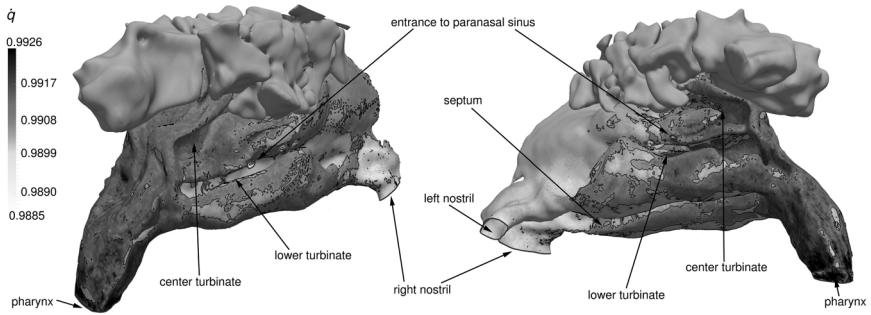
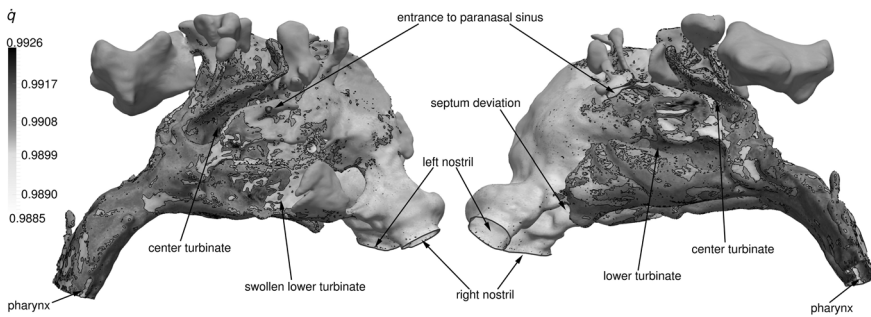
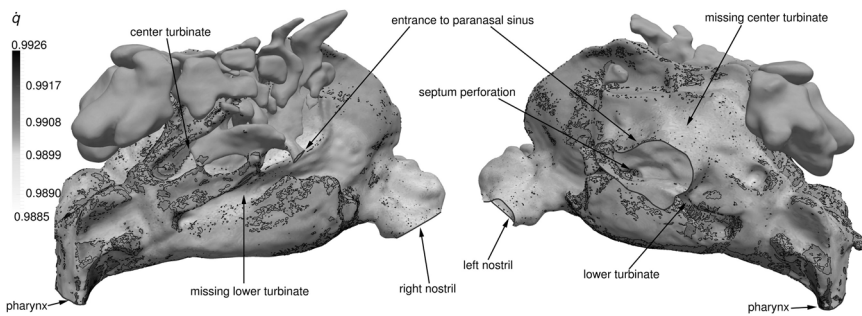
a) Heat flux \dot{q} in the nasal cavity N_g .b) Heat flux \dot{q} in the nasal cavity N_m .c) Heat flux \dot{q} in the nasal cavity N_p .

Fig. 16: Heat flux distribution \dot{q} of the various nasal cavity configurations N_g , N_m , and N_p . The paranasal sinuses were removed for better visualization.

Next, results for flow simulations and experiments have been presented to discuss the flow state. The experimental results have corroborated the numerical flow structures which have been determined without any turbulence model, thereby evidencing that the nose flow can be considered laminar.

Finally, the analysis of three real nasal cavities has shown that the removal of turbinates yields a lower total drag such that less energy is necessary to inhale. However, the heating capability is lower compared to the other configurations due to the reduced surface area. The local wall-shear stress is highest in the poor configuration resulting in an increased potential inflammation load. The septum bending and the swollen turbinates in the medium configuration lead to the highest averaged wall-shear stress. The heating capability is best for the medium geometry although the surface area and the overall heat flux distribution is smaller than that of the good configuration. However, the heating capability is strongly dependent on the flow distribution and does not necessarily correlate with the surface area and the heat flux distribution. The good configuration possesses a slightly lower heating capability and the averaged wall-shear stress distribution is lowest.

Literature

- [1] FARES, E., M. MEINKE AND W. SCHRÖDER 2000: Numerical Simulation of the Interaction of Wingtip Vortices and Engine Jets in the Near Field. AIAA Paper 2000–2046.
- [2] HÖRSCHLER, I., C. BRÜCKER, W. SCHRÖDER AND M. MEINKE 2006: Investigation of the Impact of the Geometry on the Nose Flow. *European Journal of Mechanics-B/Fluids* **25**(4), 471–490.
- [3] BHATNAGAR, P.L., B.P. GROSS AND M. KROOK 1954: A Model for Collision Processes in Gases. I. Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems. *Phys Rev* **94**(3), 511–525.
- [4] BENZI, R., S. SUCCI AND M. VERGASSOLA 1992: The Lattice Boltzmann Equation: Theory and Applications. *Physics Reports* **222**(3), 145–197.
- [5] HARTMANN, D., M. MEINKE AND W. SCHRÖDER 2008: An adaptive multilevel multigrid formulation for Cartesian hierarchical grid methods. *Comput. Fluids* **37**, 1103–1125.
- [6] HÄNEL, D. 2004: *Molekulare Gasdynamik*. Springer: Berlin, 2004.
- [7] FREITAS R.K. AND W. SCHRÖDER 2008: Numerical investigation of the three-dimensional flow in a human lung model. *Journal of Biomechanics* **41**, 2446–2457.
- [8] EITEL-AMOR, G., M. MEINKE AND W. SCHRÖDER 2013: A Lattice Boltzmann method with hierarchically refined meshes, *Comp. Fluids* **75**, 127–139.
- [9] MASING, H. 1967: Experimentelle Untersuchungen über die Strömung im Nasenmodell. *Archiv klin. exp. Ohren-, Nasen- u. Kehlkopf-Heilk.* **189**, 59–70.

- [10] PALLANCH, J.F., T.V. McCAFFREY AND E.B. KERN 1998: Otolaryngology – Head and Neck Surgery (Eds. C.W. CUMMINGS AND J.M. FREDRICKSON AND L.A. HARKER AND C.J. KRAUSE AND M.A. RICHARDSON AND D.E. SCHULLER), chapter 42 Evaluation of Nasal Breathing Function with Objective Airway Testing, 799–832. Mosby, St. Louis, 3rd edition.
- [11] HENTSCHEL, B., T. KUHLEN AND C. BISCHOF 2005: VRhino II: Flow Field Visualization inside the Human Nasal Cavity. In Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2005, 233–236, Bonn, Germany, March 12–16.
- [12] COLONIUS, T. 1997: Numerically nonreflecting boundary and interface conditions for compressible flow and aeroacoustic computations. *AIAA Journal*, **35**(7), 1126–1133.
- [13] HINCLIFFE, R. AND D. HARRISON 1976: Scientific Foundation of Otolaryngology, 502–512, William Heinemann Medical Book LTD, London.
- [14] SCHRECK, S., K.J. SULLIVAN, C.M. HO, AND H.K. CHANG 1993: Correlations between flow resistance and geometry in a model of the human nose. *J. Appl. Physiol.* **75**, 1767–1775.
- [15] VOGT, K. AND H. HOFFRICHTER 1993: Neue strömungsphysikalische Erkenntnisse in der Rhinomanometrie und ihre praktischen Konsequenzen. In: *Topische Therapie der allergischen Rhinitis* (Eds. Mösges, Schlöndorff). 45–60, Biermann Verlag, Germany,
- [16] BRÜCKER, C. AND K.I. PARK 1999: Experimental study of velocity fields in a model of human nasal cavity by DPIV. In Proc. 1st Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena (Eds. BANERJEE, S. AND K. EATON), 831–836. Santa Barbara, California, Sept. 12–15.
- [17] HOPKINS, L., J. KELLY, A. WEXLER AND A. PRASAD 2000: Particle image velocimetry in complex geometries. *Experiments in Fluids* **29**, 91–95.
- [18] LINTERMANN, A., M. MEINKE AND W. SCHRÖDER 2013: Fluid mechanics based classification of the respiratory efficiency of several nasal cavities, submitted to *Computers in Biology and Medicine*.
- [19] YU, S., Y. LIU, X. SUN AND S. LI 2008: Influence of nasal structure on the distribution of airflow in nasal cavity, *Rhinology* **46**(2), 137–143.
- [20] RIAZUDDIN, V.N., M. ZUBAIR, I.L. SHUAIB, M.Z. ABDULLAH, S.A. HAMID AND K.A. AHMAD 2010: Numerical Study of Inspiratory and Expiratory Flow in a Human Nasal Cavity, *Journal of Medical and Biological Engineering* **31**(3), 201–206. doi:10.5405/jmbe.781.

DIE BRAUNSCHWEIGISCHE WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

VERLEIHT DIE

CARL FRIEDRICH GAUSS-MEDAILLE

HERRN

PROF. DR.-ING.
WOLFGANG SCHRÖDER

AACHEN

IN WÜRDIGUNG SEINER BESONDEREN VERDIENSTE BEI DER ENTWICKLUNG VON NEUEN
NUMERISCHEN METHODEN DER STRÖMUNGSMECHANIK UND DEREN ANWENDUNG BEI
STRÖMUNGEN AN FLUGZEUGEN UND IN DER MEDIZINTECHNIK

WOLFGANG SCHRÖDER HAT DIE NUMERISCHEN METHODEN IN DER AERODYNAMIK DURCH MASSGEBLICHE BEITRÄGE ZUR MODELLBILDUNG UND ZUR NUMERISCHEN ANALYSIS SOWIE DURCH DIE ENTWICKLUNG ANWENDUNGSNAHER RECHENPROGRAMME BEFRUCHTET. ER HAT WESENTLICHE PHÄNOMENE DER STOSS-GRENZSCHICHT-WECHSELWIRKUNGEN AN SCHALLNAHEN FLUGZEUGEN UND FRAGEN DER THERMISCHEN UND MECHANISCHEN LASTEN IM HYPERSCHALLFLUG ERFORSCHT. IN DER AEROAKUSTIK HAT ER NEUE ERKENNTNISSE ÜBER DEN VON DER TURBULENZ ERZEUGTEN BREITBANDLÄRM ERREICHT. WOLFGANG SCHRÖDER HAT NEUE PERSPEKTIVEN DER STRÖMUNGSMECHANIK IN DER MEDIZINTECHNIK ERÖFFNET. DIESE ZIELEN DARAUF, BEI MEDIZINISCHEN EINGRIFFEN AM STRÖMUNGSRAUM DER NASE DEN ERWARTETEN EINFLUSS AUF DAS STRÖMUNGSVERHALTEN ZU SIMULIEREN UND INDIVIDUELL ZU OPTIMIEREN. ZU DEN BESONDEREN LEISTUNGEN VON WOLFGANG SCHRÖDER ZÄHLEN DIE INITIIERUNG UND KOORDINATION VON ZAHLREICHEN KOOPERATIVEN PROGRAMMEN DER GRUNDLAGENFORSCHUNG, DIE ER INSBESONDERE AUF INTERDISZIPLINÄRE FRAGESTELLUNGEN AUSGERICHTET HAT.

Braunschweig, den 30. April 2013



Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein
Präsident
der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft

Schröder, Wolfgang, Dr.-Ing., Univ.-Prof., Lehrstuhl für Strömungslehre und Aerodynamisches Institut, RWTH Aachen, Wüllnerstraße 5 a, 52062 Aachen

- 1957 Geburt am 4. September in Neuss
- 1983 Abschluss des Studiums als Dipl.-Ing. (RWTH Aachen)
- 1983–1987 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Aerodynamischen Institut der RWTH im Schwerpunktprogramm „Finite Approximationen in der Strömungsmechanik“
- 1987 Promotion zum Dr.-Ing. (RWTH Aachen)
- 1987 Borchers-Plakette der RWTH Aachen
- 1988 Hermann-Reissner-Preis (gemeinsam mit D. Hänel und R. Schwane)
- 1987–1989 DFG-Stipendiat am California Institut of Technology (Caltech)
- 1989–1995 Leiter der Aerodynamik im Bereich Raumfahrtinfrastruktur, DASA AG
- 1995–1998 Professor für Mathematik und Statistik an der FH Braunschweig/Wolfenbüttel
- 1998 Universitätsprofessor und Leiter des Aerodynamischen Instituts der RWTH Aachen
- 2008 Zuwahl in die Nordrhein-Westfälische Akademie der Wissenschaften
- 2010–2012 Dekan der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH Aachen

Forschungsschwerpunkte: Strömungsmechanik, insbesondere komplexe turbulente Strömungen, numerische Strömungssimulation durch mathematische Modellbildung, Anwendung der Strömungsmechanik auf medizinische Problemstellungen. Initiierung und Koordination zahlreicher kooperativer Programme der Grundlagenforschung im Bereich der Strömungsmechanik, so eines SFB am Aachener Universitätsstandort und des ortsübergreifenden SFB-Transregio TRR 40.

Schlusswort zur Jahresversammlung der BWG am 26.04.2013

Meine sehr verehrten Damen und Herren,
werte Festgesellschaft,

„Strömungsmechanik im interdisziplinären Kontext“ – so lautet das Thema, der Untertitel des spannenden Festkolloquiums heute Vormittag, das der Vielfalt der Forschungsaktivitäten des Laureaten, Herrn Prof. Schröder, angemessen war. Ihnen, geehrter Herr Schröder, ist zu gratulieren und zu danken für diese Anregung durch Ihre interdisziplinäre Arbeit. Und den Referenten des Kolloquiums dafür, dass Sie diese Anregung aufgenommen haben für die Gestaltung des Programms: von der Entwicklung von Herz- und Lungen-Unterstützungssystemen über die Strömungsdynamik von Herzklappenprothesen und die Modellbildung unseres Atmungsorgans bis zum Wohlbefinden durch den nasalen Luft- und Duftstrom und schließlich in dem faszinierenden Festvortrag über den Weg „vom Nasenmodell zur realen Nase“.

Interdisziplinär von der Medizintechnik bis in die Wahrnehmungsphysiologie und Ästhetik eines unserer Sinnesorgane! Ist doch die Nase nicht nur Atmungs- sondern auch Riechorgan im physiologischen und psychologischen Sinne mit der Bahnung von Zu- und Abneigung zwischen Personen.

Gehen wir von dem Begriff der Strömungsmechanik zu dem der Strömungsdynamik, so wird der weite Horizont des interdisziplinären Kontextes noch deutlicher. Wer denkt nicht bei dem Wort Strömung an Kunst- und Modeströmungen, in die wir aktiv und passiv verwickelt sind? Und wenn es heißt, wir können nicht zweimal in denselben Fluss steigen, weil er wie wir ein anderer geworden ist bzw. sind, sobald wir uns anschicken, ein zweites Mal hinein zu steigen, so ist es der Strom der Zeit als solcher, die uns durchlebt und in der wir leben – die Zeit in ihren drei Dimensionen von Zukunft und Vergangenheit, die wir je in der aktuellen Gegenwart leben: als kaum berechenbarer Entwurf, als Erwartung oder Hoffnung oder Angst und Sorge, d. h. als Vorgriff, bzw. als Erinnerung und Prägung oder selbst- und fremdgestaltete Ermöglichung des Jetzt aus der Vergangenheit. Morgen ist heute gestern, gestern war heute morgen. „Ach, könnt’ ich doch zum Augenblicke sagen, verweile doch ...“ Der Augenblick, der rechte Augenblick ist ja trotz seiner Flüchtigkeit das intensive Erfassen des Gebotenen, geprägt vom Möglichen, ist Freiheit und Notwendigkeit.

Und noch in anderem Sinne ist die Zeit, der Zeitstrom vielfältig in uns und wir in ihr, in ihm: als physikalisch-messbare Zeit, als biologische Zeit mit ihrem nicht-linearen Ablauf von der befruchteten Eizelle zur Geburt, zu Wachstum und Reife und Vergehen in den Tod, als psychologische Zeit intensiven Erlebens, des flow-Erlebnisses oder der Langeweile oder Verdrängung, als nicht metrische Zeit des

Unbewussten und des Traumes, als biographische Handlungs- und Erfahrungszeit mit der Paradoxie von Gleichzeitigem und Ungleichzeitigem oder als existenzielle Zeit zwischen Erwartung und Erinnerung, Hoffnung und Verlust und schließlich als soziale Zeit datierbarer Vereinbarungen und gemeinsamen Erlebens. So führt uns das Nachdenken über „Strömungsdynamik im interdisziplinären Kontext“ über den wissenschaftlichen Horizont hinaus in die lebensweltliche Erfahrung unserer vergänglichen menschlichen Existenz: von numerischen und mechanischen Modellen des Blut- und Atemstromes zu Einsichten in unsere individuelle und soziale anthropologische Konstitution. Für solche Denkanstöße haben wir Ihnen, verehrter Herr Schröder, und den Kolloquiumsreferenten und dem offenen Publikum, d.h. Ihnen, meine Damen und Herren, herzlich zu danken.

Ich darf Ihnen einen guten Abend und ein frohes Frühjahr wünschen.

Veranstaltungen der BWG

Vortragsreihe im phäno „Licht“

Begleitende Vortragsreihe zur Sonderausstellung „Licht.Schatten.Farbe“

Veranstaltungstag: Donnerstag., 10. und 17.01., 07., 14. und 21.02.2013,
18.30–19.30 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Akademie der Wissenschaften zu Göttingen
phaeno, Wolfsburg
I.P.I, Wolfsburg

Veranstaltungsort: phäno, Wissenschaftstheater, Willy-Brandt-Platz 1,
38440 Wolfsburg

Das Geheimnis des Lichts. Wissen – Glaube – Kunst

Licht – seit Urzeiten ein für die Menschen faszinierendes Phänomen – umflutet jeden von uns seit dem ersten Augenblick. In den meisten Kulturen ist Licht etwas Sakrales und Göttliches und daher Gegenstand von religiösen und künstlerischen Darstellungen. Die ständig wachsenden Erkenntnisse in der Physik des Lichts führen zu zahlreichen neuen Produkten und Anwendungen wie Glasfasertechnik, LEDs oder Lasermedizin. Trotz allem bleibt jedoch die Natur des Lichts ein Geheimnis: Ist Licht nun Welle oder Teilchen, beides oder keines von beiden – was aber dann?

Im Rahmen dieser neuen Reihe mit insgesamt fünf Vorträgen aus den Naturwissenschaften, der Medizin, der Theologie und Kunstgeschichte zeigten die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen und die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft in Kooperation mit I.P.I und phaeno, wie sehr das Licht unsere Welt durchflutet.

Dipl.-Phys. Marcus Weber, Physikanten & Co., Witten (10. Januar 2013)

Marcus Weber, geb. 1971, ist Mitgründer und Geschäftsführer der Physikanten, Deutschlands größtem Anbieter von unterhaltsamen Wissenschaftsshows. Neben ihrer Bühnenarbeit für Schulen, Science Center und Firmen beraten die Physikanten auch diverse Fernsehsendungen.

Löcher-Lupen und Gurken-Galaxien – Erstaunliches über das Licht und unsere Augen

Licht ermöglicht nicht nur, dass wir sehen können, sondern es ermöglicht, dass Milliarden von Telefonaten gleichzeitig durch eine winzige Glasfaser gelangen können und dass wir sagen können, aus welchen Stoffen Sterne am Rande des Weltraums bestehen. Noch erstaunlicher wird das Licht im Zusammenspiel mit unseren Augen. In diesem Experimentalvortrag wird gezeigt, dass eine Gurke eine Menge mit dem Spektrum des Sonnenlichts zu tun hat und dass aus einem simplen kleinen Loch im Papier ein anspruchsvolles optisches Instrument wird.

Prof. Dr.Andreas Waag, TU Braunschweig (17. Januar 2013)

Prof. Andreas Waag ist seit 2003 Leiter des Instituts für Halbleitertechnik der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsgebiete sind nanoskalige Halbleiter-Bauelemente und neue Materialien für die Optoelektronik, Elektronik, Sensorik und die nachhaltige Energiegewinnung. Prof. Waag ist Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Die Lichtrevolution: Lichttechnik mit LEDs

Licht ist ein sehr geheimnisvolles Phänomen. Wir brauchen es zum Leben – ohne Licht gäbe es keine Photosynthese und damit auch keinen Sauerstoff. Licht bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit – der schnellsten Geschwindigkeit, die in unserem Universum überhaupt möglich ist. Und Licht macht die Dunkelheit zum Tag, ist Informationsträger, transportiert Energie, beeinflusst unsere Empfindungen. Was aber ist Licht? Wie nehmen wir Licht als Menschen wahr? Und wie erzeugt man es künstlich?

Lichtemittierende Dioden (LEDs) revolutionieren gerade die Lichttechnik - zu Hause, als Straßenbeleuchtung, am Fahrzeug. Wie sind LEDs aufgebaut? Warum sind LEDs so effizient? Was macht LEDs so interessant?

Prof. Dr. Holger Lubatschowski, Leibniz Universität Hannover und ROWIAK GmbH (7. Februar 2013)

Holger Lubatschowski gründete am LaserZentrum Hanover e. V. die Abteilung „Biomedizinische Optik“. Im Jahr 2010 verließ Herr Lubatschowski das Institut, um sich ganz den Aufgaben seines eigenen Unternehmens zu widmen, welches Lasersysteme für den Life-Science-Bereich und die Augenchirurgie herstellt.

Heilen mit Licht: Vom Einsatz des Lasers in der Medizin

Bereits Hippokrates hat das Licht als Ultima Ratio in der Anwendungskaskade medizinischer Behandlungen erkannt. In der modernen Lasermedizin zählt das

kohärente Licht tatsächlich oftmals als die beste oder gar letzte Chance, einen Heilungsversuch erfolgreich zu beenden.

Laser können durch gezielte Zerstörung – oftmals mit Mikrometerpräzision – Änderungen am Organismus hervorrufen, die in einer erfolgreichen Wundheilung münden. Die Grundlage der Laser-Gewebe-Wechselwirkung sind photochemischer, thermischer oder thermomechanischer Natur. Die Einwirkung kann sanft oder mit unvorstellbar hohen Intensitäten erfolgen.

Der Vortrag erklärte die grundlegenden Wechselwirkungsmechanismen der Lasermedizin und zeigte Beispiele aus verschiedenen Disziplinen. Ein Schwerpunkt bildete dabei die Augenchirurgie mittels sogenannter "ultrakurzer" Laserimpulse, mit denen man heute Fehlsichtigkeiten korrigiert oder die Operation am Grauen Star sicherer und möglicherweise noch erfolgreicher durchführen kann als es bislang den konventionellen Methoden gelingt.

Prof. Dr. Joachim Ringleben, Göttingen (14. Februar 2013)

Prof. Dr. Joachim Ringleben, geb. 1945, war von 1983 bis 2010 Professor für Systematische Theologie an der Universität Göttingen. Er ist ordentliches Mitglied der Akademie zu Göttingen und Abt von Bursfelde.

In deinem Lichte sehen wir das Licht – Philosophisches und Theologisches zum Licht

Auch in der Bibel ist "Licht" ein zentrales Thema. An die biblischen Hinweise schlossen sich philosophische Überlegungen zum Phänomen des Lichtes an. Danach wurde das Verhältnis von Gott und Licht systematisch erörtert. Zwischen der Unsichtbarkeit Gottes und seiner Lichtnatur vermittelt die Sprache; daher ging es zum Schluss des Vortrags um das Verhältnis von Wort und Licht.

Prof. Dr. Manfred Luchterhandt, Georg-August-Universität Göttingen (21. Februar 2013)

Manfred Luchterhandt war Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte in Rom und an der Universität Münster und ist seit 2011 Professor für mittelalterliche Kunstgeschichte an der Georg-August-Universität Göttingen mit den Schwerpunkten Südeuropa und Mittelmeerraum.

Lichtgestalten: Zur Anthropologie des Sakralen in der Kunst des Mittelalters

Dass sich Sakrales und Göttliches häufig als Licht, Glanz oder numinoses Leuchten manifestieren, gehört zu den Hinterlassenschaften der Antike, die von der christlichen Kunst des Mittelalters und ihrer literarischen Wahrnehmung vielfältig aufgegriffen wurden. Licht in den verschiedenen Formen der stofflichen, mimetischen oder metaphorischen Anverwandlung war eine der wichtigsten Möglich-

keiten, Transzendenz in der Welt sichtbar zu machen und ein Kernproblem des Monotheismus, die Nicht-Darstellbarkeit des Unendlichen, zu bewältigen.

Der Vortrag diskutierte an Beispielen die Formen der Materialisierung, Metaphorisierung und Wahrnehmung von Licht im frühen und hohen Mittelalter (Gold, Mosaik, Ikonographie von Nimbus, Aura oder Lichtkörper) als Teil einer visuellen Anthropologie des Sakralen, bevor die systematische Naturbeobachtung die Rolle des Lichts grundlegend veränderte.

Akademie-Vorlesung im Schloss

Phänomen Raum

- Veranstaltungstage: 05.02., 17.04., 11.06., 23.10. und 13.11.,
jeweils 18.30 Uhr
- Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft,
Kulturinstitut der Stadt Braunschweig
- Veranstaltungsort: Roter Saal, Schloss Braunschweig, Schlossplatz 1
- Leitung der Vortragsreihe: Prof. Dr. Dr. h.c. Joachim Klein,
Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Unter diesem Namen laden seit 2007 die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und das Kulturinstitut der Stadt Braunschweig zu Vortragsreihen ein mit dem Ziel, zum Nachdenken und zur Diskussion wissenschaftlicher und lebensweltlicher Themen anzuregen.

Nachdem über zwei Jahre hin die Vorträge zum „Phänomen Zeit“ großen Anklang gefunden hatten, wurde die Reihe unter dem Leitthema „Phänomen Raum“ fortgesetzt.

Wie die Zeit so ist auch der Raum ein komplexes, vielseitiges Phänomen: vom kosmischen Weltraum bis zu den Ordnungsstrukturen biologischer Räume, von der Anschauung in Architektur und Kunst zum Klang- und Lichtraum der Musik, vom messbaren Raum bis zu dem mit unserem Zeiterleben verbundenen Erlebnisraum im Alltag bis hin zu den verzerrten Raumwahrnehmungen im Traum oder bei psychischen Störungen – ein weites Spektrum möglicher Raumerfahrungen! Wie prägen sie unseren sozialen Verhaltensraum? Wie unser Selbstempfinden, unseren „Innenraum“? Wie gestalten und nutzen wir unseren sich mit der Technik und Mobilität erweiternden Lebensraum?

Die Vortragsreihe zum „Phänomen Raum“ beleuchtete die vielfältigen Fragestellungen aus dem Blickwinkel verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen.

An die Vorträge schloss sich stets eine Diskussion mit den Referenten an.

Prof. Dr. **Reinhard Werner**, Institut für Theoretische Physik der Leibniz Universität Hannover, BWG-Mitglied (5. Februar 2013)

Wenn Raum und Zeit sich krümmen – von Newtons Apfel zum schwarzen Loch

Zu den erstaunlichen Entwicklungen der Physik des 20. Jahrhunderts gehört es, dass Konzepte, die eigentlich für die Geometrie, also die Theorie des Raumes entwickelt worden waren, mit kleinen Änderungen auch für die Theorie der Raum-Zeit, also Einsteins Gravitationstheorie, Anwendung fanden. In diesem Vortrag werden die Analogien vorgestellt, die der Geometrisierung der Gravitationstheorie zu Grunde liegen. Zentral dafür ist der Begriff der Krümmung, der die Wirkung der Gravitation auf die Bewegung von Körpern beschreibt. Um Krümmung zu verstehen, braucht man also kein besonderes Talent, sich mysteriöse höherdimensionale Welten vorzustellen. Die wesentlichen Aussagen sind schon aus der Bewegung von Lichtstrahlen und frei fallenden Körpern abzuleiten.

Martin Weller, Orchesterdirektor des Staatsorchesters Braunschweig (17. April 2013)

Musik und Architektur – Aspekte einer quadrivialen Beziehung

Die Frage nach der Relevanz des Zeit-Raum-Verhältnisses in der Kunst stellt sich konkret seit der „Pictura ut poesis“ – Hypothese in Horaz' „Ars poetica“. Im Rahmen des wesentlich durch Filippo Brunelleschi geprägten bedeutenden „Iconic turn“ der Frührenaissance wird die wieder aufgenommene Rangordnungsdebatte der Künste durch Leon Battista Alberti auf die Kunstform Musik ausgedehnt und deren Theoriesubstanz als maßgeblich für die Baukunst gesehen. Die Teilungsverhältnisse schwingender Saiten werden zur Gestaltungsgrundlage architektonischer Proportionen; Fassaden in Florenz und Rimini werden zu „schweigender“ Musik. Neben der Darstellung gemeinsamer Theorieansätze am Beginn der Neuzeit befasst sich der Vortrag mit den Vergleichbarkeiten der Mnemo-Phänomene in der Entwicklung der architektonischen und musikalischen Stilepochen von der Renaissance bis zum Beginn der Moderne im frühen 20. Jahrhundert.

Prof. Dr. **Dietmar Schomburg**, Institut für Biochemie, Biotechnologie und Bioinformatik, TU Braunschweig, BWG-Mitglied (11. Juni 2013)

Raum. Struktur und Funktion in den molekularen Biowissenschaften

Leben ist nur möglich durch Wechselwirkungen von vielen Tausend verschiedenen chemischen Verbindungen in den Zellen und im Gesamtorganismus. Dabei sind die Moleküle in der Lage, sich selbst zu organisieren und z.B. Zellen zu bilden, oder auch unsere Nahrung mit Hilfe des hochkomplexen Stoffwechsels in die Bestandteile unseres Organismus umzuwandeln. Proteine, Kohlenhydrate, Fette,

Gene spielen dabei unterschiedliche Rollen, alle aber können ihre Aufgaben nur dadurch wahrnehmen, dass sie ganz bestimmte Strukturen haben und entweder sehr kurzlebige oder langfristig stabile Wechselwirkungen eingehen. Dafür müssen sie komplementär zueinander sein, d.h. ihre Raumerfüllung und ihre Oberflächeneigenschaften müssen jeweils zueinander passen. Auch ein Medikament kann nur dann wirken, wenn es sterisch zu seinem Wirkort, meistens ein Protein, passt, unser Immunsystem, wenn die Antikörper die infektiösen Bakterien oder Viren räumlich erkennen.

Prof. Dr. Prof. h. c. **Reiner Hildebrandt-Stramann**, Seminar für Sportwissenschaft und Sportpädagogik, TU Braunschweig (23. Oktober 2013)

Aus der Tiefe des Raumes – Bewegung und Leiblichkeit

Das Thema „Aus der Tiefe des Raumes“ ist dem Titel der Biographie des Fußballers Günther Netzer entnommen. Es dient als Ausgangspunkt für eine phänomenologische Sicht auf den Raum als Handlungsraum oder auch als „gelebten Raum“. Damit wird eine zum naturwissenschaftlichen Raumverständnis gegensätzliche Position eingenommen, die zeigt, dass der Raum ein an das Subjekt gebundenes, leiblich erfahrbares Medium ist. Im weiteren Verlauf des Vortrags wird der Fokus auf diese leiblichen Dimensionen des Raumes gelegt und an Beispielen aus empirischen Untersuchungen zum Schulraum veranschaulicht und entsprechend dem „Anti-Kantianischen Grundsatz“ „Nichts ist im Verstande, was nicht zuvor in den Sinnen war“ konstruktiv gewendet. Eine Fortsetzung dieser konstruktiven Wende finden wir auch auf einer kulturtheoretischen Ebene. An den Beispielen der „Erfahrungsfelder der Sinne“ von Hugo Kükelhaus und Rudolf zur Lippe und der „Revolutionierung des plastischen Raumbegriffs“ von Alberto Giacometti wird die zuvor vorgetragene leibanthropologische und phänomenologische Sicht auf den Raum weiter verdeutlicht.

Prof. Dr.-Ing. **Marcus Magnor**, Institut für Computergrafik, TU Braunschweig, BWG-Mitglied (13. November 2013)

Wie wir räumlich wahrnehmen, oder: warum auch Piraten Auto fahren können

In der Natur treten Augen meist in Paaren auf. Allerdings gönnen sich nur wenige Tiere den Luxus, mit beiden Augen in dieselbe Richtung zu schauen, um die Welt in Stereo sehen zu können. Denn in vielen Fällen reicht schon eine einzelne Ansicht, um die räumliche Struktur unserer Umgebung zu ermitteln. Im Vortrag geht es darum, wie wir räumlich sehen, mit einem und mit zwei Augen, weshalb 3D-Kino (manchmal nicht) funktioniert und warum wir wohl auch weiterhin gerne konventionelle Filme anschauen werden.

Regionalgeschichtliches Symposium

„Bildung und Kultur“

Carl I.: Politik der Nachhaltigkeit im Zeitalter der Aufklärung

Veranstaltungstag: Freitag, 31. Mai 2013, 10.00–17.00 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft/ BWG (Präsident Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein) und Institut für Braunschweigische Regionalgeschichte an der TU Braunschweig (Prof. Dr. h. c. Gerd Biegel)

Veranstaltungsort: Institut für Braunschweigische Regionalgeschichte, Fallers-leber-Tor-Wall 23, 38100 Braunschweig

Vor 300 Jahren, am 1. August 1713 wurde Herzog Carl I. (1713–1780) geboren. Es war ein bewegtes Jahrhundert, in das Leben und Regierung des braunschweigischen Herzogs Carl I. fiel. Die Aufklärung setzte die Zeichen der Zeit und von ihren Ideen und Auswirkungen war auch das Fürstentum Braunschweig-Wolfenbüttel vielfältig betroffen, denn alle Bereiche des öffentlichen und des privaten Lebens befanden sich in Europa im Umbruch. Diese Epoche des Umbruchs führte zum Ende der Alten Welt und schuf gleichzeitig die Zukunft der Moderne.

Für Herzog Carl I. besaß das Bildungswesen eine große Bedeutung und wurde einer gründlichen Erneuerung unterworfen. Die wirkungsmächtigste und nachhaltigste bildungspolitische Maßnahme war das 1745 auf Anregung von Abt Jerusalem (1709–1789) gegründete Collegium Carolinum, in dessen Tradition die Technische Universität Carolo-Wilhelmina noch heute steht. Diesem besonderen Aspekt widmeten die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und das Institut für Braunschweigische Regionalgeschichte an der TU Braunschweig ein Regionalgeschichtliches Symposium.

Programm

10.00 h: Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein, BWG Braunschweig

Begrüßung/Einführung und Moderation

10.15 h: Prof. Dr. h.c. Gerd Biegel, TU Braunschweig

Der Hof von Braunschweig besaß damals wahrhaft königlichen Glanz

Herzog Carl I. – Wissenschaft, Wirtschaft, Kultur und Bildung: Politik der Nachhaltigkeit im 18. Jahrhundert

11.00 h: Dr. Angela Klein, BLM Braunschweig

...ein in seiner Art fast einziges Institut

Bildung und Wissenschaft – die Gründungsphase des Collegium Carolinum und Herzog Carl I.

12.00 h: Prof. Dr. Ulrich Joger, SNHM Braunschweig

... ansehnlichen Naturaliensammlung, auf dem hiesigen Mosthause

Herzog Carl I. und die Anfänge des Naturhistorischen Museums im Zeitalter der Aufklärung

14.00 h: Prof. Dr. Dietmar Brandes, TU Braunschweig und Vizepräsident BWG

Daß man aber die Bücher so lange will bey sich herumschlurren lassen...dazu ist keine öffentliche Bibliothec angeordnet

Herzog Carl I. als Bücherfreund und die Bibliothek des Collegium Carolinum

14.45 h: Prof. Dr. Dr. Claus-Arthur Scheier, TU Braunschweig und BWG

Wage, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen!

Philosophische Grundlagen in der Epoche von Herzog Carl I.

15.30 h: Prof. Dr. Thomas Sonar, TU Braunschweig und BWG

Wissenschaften, die einem jeden Menschen in allen Ständen nützlich sind

Die Mathematik in den Anfängen des Collegium Carolinum

16.15 h: PD Dr. Till Kinzel, Paderborn

...eine literarische Macht in Deutschland

Johann Joachim Eschenburg und die Weltläufigkeit der Wissenschaft am Collegium Carolinum

9. Bioethik-Symposium

Infektionsmedizin der Zukunft – Herausforderungen für Individuum und Gesellschaft

Veranstaltungstag: Mittwoch, 19. Juni 2013, 14.00–18.00 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung GmbH Braunschweig

Veranstaltungsort: Haus der Wissenschaft, Pockelsstraße 11, 38100 Braunschweig, Raum Veolia, 5. OG

Weltweit gehören Infektionskrankheiten zu den häufigsten Todesursachen – und ihre Gefährlichkeit nimmt zu. Immer mehr krankheitserregende Bakterien werden unempfindlich gegen die Antibiotika, mit denen die Medizin gegen sie vorgeht. Von Epidemien, die sich über die ganze Welt ausbreiten, über neue Krankheitserreger bis hin zu dem erheblichen Aufwand für die Krankenversorgung: Infektionskrankheiten sind ein globales Problem mit immensen ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen.

Ihre Bekämpfung wird uns in Zukunft vermehrt vor schwierige Fragen und Aufgaben stellen, von der Grundlagenforschung zur Antibiotikaresistenz über die klinische Anwendung bis zu rechtlichen und ethischen Problemen. Wie gewährleisten wir Gerechtigkeit im Zugang zu Prävention, Diagnostik und Therapie? Darf man bei akuter Seuchengefahr Impfungen für bestimmte Berufs- und Bevölkerungsgruppen verpflichtend vorschreiben oder greift eine solche Direktive zu sehr in persönliche Freiheitsrechte ein? Darf man sich über Eigentums- und Patentrechte hinwegsetzen, um Arzneimittel für bedürftige Menschen verfügbar zu machen? Wie sind Stigmatisierung und Diskriminierung von Infizierten oder von Menschen mit erhöhtem Infektionsrisiko zu vermeiden? Wo sollten Gesellschaft und Politik regulierend eingreifen – bei der Sicherstellung einer kontrollierten Anwendung von Antibiotika, bei der gezielten Entwicklung neuer Wirkstoffe, auch wenn deren Wirtschaftlichkeit nicht garantiert werden kann? Wo stoßen Grundlagenforschung und klinische Praxis an moralische Grenzen? Und was muss uns die Erforschung von Infektionskrankheiten wert sein?

Mit Fragen wie diesen befasste sich das 9. Bioethik-Symposium der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, diesmal in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (HZI). Experten aus Medizin, Grundlagenforschung und Ethik erörterten Aspekte des facettenreichen Themas und diskutierten mögliche Antworten.

Programm

14:00 Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein und Prof. Dr. Dirk Heinz

Begrüßung und Einführung

14:15 Prof. Dr. Gérard Krause, Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung GmbH

Grundlagen der Epidemiologie: Wie erkennen und bekämpfen wir Seuchen?

15:00 Prof. Dr. Ulrich Kalinke, TWINCORE – Zentrum für Experimentelle und Klinische Infektionsforschung

Infektionsforschung zwischen Grundlagen und klinischer Anwendung

16:15 Prof. Dr. Reinhold E. Schmidt, Medizinische Hochschule Hannover

Seuchenbekämpfung: Eine Erfolgsgeschichte, begleitet von Ängsten und Tabus

17:00 PD Dr. Walter Bruchhausen, RWTH Aachen

Ethische Fragen des Umgangs mit Infektionskrankheiten: Welche Abwägungen müssen wir treffen?

17:45 Prof. Dr. Klaus Gahl

Schlusswort

Bericht 9. Bioethik-Symposium

Infektionsmedizin der Zukunft – Herausforderung für Individuum und Gesellschaft*

Weltweit gehören Infektionskrankheiten zu den häufigsten Todesursachen der Menschen. Immer mehr krankheitserregende Bakterien werden unempfindlich gegen Antibiotika. Von Epidemien, die sich über die ganze Welt ausbreiten, über neue Krankheitserreger bis hin zu dem erheblichen Aufwand für die Krankenversorgung: Infektionskrankheiten sind ein globales Problem mit immensen ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen. Ihre Bekämpfung wird uns in Zukunft vermehrt vor schwierige Aufgaben stellen: von der Grundlagenforschung über die Mechanismen der Antibiotika-Resistenz zur klinischen Anwendung bis zu rechtlichen und ethischen Konflikten. Wo stoßen Grundlagenforschung und klinische Praxis an moralische Grenzen? Wie gewährleisten wir Gerechtigkeit im Zugang zu Prävention, Diagnostik und Therapie? Dürfen bei Seuchengefahr Impfungen für bestimmte Berufs- oder Bevölkerungsgruppen verpflichtend vorgeschrieben werden oder greift eine solche Direktive in persönliche Freiheitsrechte ein? Wie sind Stigmatisierung und Diskriminierung von Infizierten oder von Menschen mit erhöhtem Infektionsrisiko zu vermeiden? Wo sollten Gesellschaft oder Politik regulierend eingreifen? Und was muss uns national und global die Erforschung von Infektionskrankheiten wert sein?

Mit derartigen Fragen befasste sich das 9. Bioethik-Symposium, diesmal in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung (HZI), Braunschweig, und dem Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) an der Medizinischen Hochschule Hannover. Experten aus Medizin und der epidemiologischen Forschung und der Bioethik erörterten das facettenreiche Thema wieder aus der Sicht der Grundlagenforschung, der klinischen Anwendung, rechtlicher Regularien und der ethischen Implikationen.

Prof. Dr. Gérard Krause, HZI, eröffnete die Vortragsreihe mit den „*Grundlagen der Epidemiologie: Wie erkennen und bekämpfen wir Seuchen?*“ Ausgehend von einer vermuteten oder nachgewiesenen Quelle ansteckender (infektiöse) Agentien können Krankheitserreger (Bakterien, Viren o.a.) einen empfänglichen Organismus treffen und besiedeln, sofern dieser nicht (durch eine vorausgegangene Infektion oder durch Impfung) immun ist. Dringen die Erreger in den Organismus ein, so entwickelt sich mit der Reaktion des Empfängers evtl. eine Infektionskrankheit,

* vorgelegt von Klaus P.G. Gahl am 24.12.2013.

die beschwerdefrei oder aber akut oder schleichend symptomatisch verlaufen kann hin zur völligen Ausheilung oder zum gesunden Trägerstadium des Infizierten mit chronischer Infektion oder aber mit letalem Ausgang. Im Prozess von der möglichen Infektion zur manifesten Krankheit und ihren Folgen hat die epidemiologische Überwachung drei Kernaufgaben: (a) die Erkennung der Infektionsquelle und möglichst deren Elimination, (b) die Eindämmung und Verzögerung von Ansteckung mit dem besonderen Schutz gefährdeter Personengruppen und (c) die Senkung der Infektionswahrscheinlichkeit in der Grundbevölkerung. Diese Aufgaben werden durch (a) Verdachtsmeldungen, aktive Fallsuche und Laborabklärung, (b) durch gezielte Schutz- und Therapie- bzw. (c) strikte Hygienemaßnahmen, Therapie und Impfung verfolgt. Als 1. Beispiel derartiger Aufklärung schilderte Krause die Ermittlung der Krankheitsursache und -quelle des bis dahin eher seltenen hämolytisch-urämisches Syndroms (HUS) im Rahmen einer blutigen Durchfallerkrankung durch *Escherichia coli* O104:H4 nach Genuss von Bambussprossen in Deutschland im Mai – Juli 2011 (in Deutschland 48 Todesfälle bei 857 gemeldeten Krankheitsfällen mit HUS).

Vordringlich sind stets die rasche Meldung von Verdachtsfällen, die Überwachung der Ausbreitung und die Meldepflicht für ausgewählte Infektionskrankheiten. In 2001 wurde ein deutsches Infektionsschutzgesetz vorgelegt – auch mit dem Appell an die Eigenverantwortung der Träger und Leiter von Gemeinschafts- und Gesundheitseinrichtungen und Lebensmittelbetrieben. Zu den Schutzmaßnahmen kann auch gegen den Willen der Betroffenen eine Impfpflicht bei erwartungsgemäß schweren Krankheitsverläufen oder eine Quarantäne (gem. § 30 IfSG) vorgenommen oder ein berufliches Tätigkeitsverbot (§ 31 IfSG) verhängt werden. Das berührt im Grundgesetz verankerte Personenrechte (Freiheit der Person, körperliche Unversehrtheit, ärztliche Schweigepflicht u.a.).

Ein 2. Beispiel epidemiologischer Aufklärungsarbeit war die im Nov. 2002 in Südchina/Hongkong ausgebrochene und durch Flugreiseverkehr sich ausbreitende Erkrankung an einer schweren akuten Atemwegserkrankung, einer atypischen Lungenentzündung (SARS = severe acute respiratory syndrome). Sie konnte zunächst auf die Erkrankung einer Einzelperson nach Genuss von Delikatessfleisch zurückgeführt werden, die kurz darauf (nach einer bei weiteren Erkrankungsfällen ermittelten Inkubationszeit von 2–7 Tagen) weitere Erkrankungen nach sich zog. Die von dem Erst-Erkrankten zu den weiteren Patienten führende Infektionskette konnte in fast kriminologischer Aufklärungsarbeit verfolgt werden: in weite Bereiche Südostasiens, nach Canada und in die USA. Binnen eines halben Jahres waren > 8000 wahrscheinliche Infektionen mit 774 Todesfällen registriert worden (bis Juli 2003) in 30 betroffenen Ländern. Auch in Deutschland wurden 38 Verdachtsfälle gemeldet, aber keine Übertragungen. Als Infektionsmodus erwies sich eine Tröpfcheninfektion infolge von Husten und Niesen der an dem SARS Erkrankten. Durch Isolierung von verdächtigen oder sicher erkrankten Personen über 10 Tage konnte die Epidemie eingedämmt werden.

Hinsichtlich der Empfehlungen von Präventionsmaßnahmen sind der individuellen und der gesellschaftlichen Erkrankungssituation entsprechende Flexibilität, der Schutz der Privatsphäre und das Selbstbestimmungsrecht des Einzelnen zu beachten wie auch die begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen; sie sind abzuwägen gegen die Sicherheit der Diagnostik der zu vermeidenden Krankheit, das öffentliche Bedürfnis der Gefahrenabwehr und der Effektivität der vorgesehenen Maßnahmen. Weltweit ist die Kooperation eines engen Netzwerks von Institutionen mit regulatorischer Kompetenz erforderlich (z.B. das GOARN = Global Outbreak Alert & Response Network) zur schnellen Identifikation, Beweisführung und der Beurteilung der Effektivität der ergriffenen Maßnahmen gegen den Ausbruch. Die internationale Standardisierung epidemiologischer, labormedizinischer und klinischer Prozeduren, die Kooperation und Koordination sind unabdingbar in der Bekämpfung globaler Epidemien. Ein Ziel muss auch die national und international koordinierte rechtliche Regulation und Finanzierung, die Bereitstellung und Überwachung vernetzbarer Melde- und Kommunikationszentren sein bezüglich der Risikosituation und der Wirksamkeit von Vorkehrungen. Die 2005 revidierten internationalen Gesundheitsvorschriften (IGV) der WHO schreiben die Rechtsverbindlichkeit für die Mitgliedstaaten, die Meldepflicht von auffälligen Krankheitsfällen mit potenziellen Konsequenzen für andere Länder vor; sie ermächtigen die WHO, relevante Informationen anzufordern und selbständig auszuwerten. Zielkrankheiten dieser Bestimmungen sind mehrere Viruserkrankungen (Polio, Pocken, SARS-Corona-, Ebola-, Marburg-Virus u.a.), Meningokokken, Pest u.a. Mit der Akzeptanz solcher Regularien geben die Mitgliedstaaten der WHO einen Teil ihrer nationalen Souveränität zugunsten eines besser vernetzten Seuchenschutzes auf.

Krause beschließt seinen packenden Übersichtsvortrag mit dem Hinweis auf eine Charta zur ärztlichen Berufsethik amerikanischer und europäischer Medizingesellschaften, „Medical Professionalism in the New Millenium“. Die Charta führt 10 Richtlinien für die Verantwortung jedes Arztes gegenüber dem Kranken und gegenüber der Gesellschaft auf, jedoch dabei nicht den so wichtigen Aspekt der Prävention; das sieht Krause als Indiz dafür, dass die Prävention seitens der Ärzteschaft nicht die Aufmerksamkeit erfährt, die ihr gebührt.

Wie die epidemiologische Aufklärung und Überwachung von Infektionskrankheiten der globalen Kooperation einer Vielzahl von Institutionen bedarf, so ist auch die „*Infektionsforschung zwischen Grundlagen und klinischer Anwendung*“ (**Prof. Dr. Ulrich Kalinke**, twincore Hannover) auf die Zusammenarbeit zahlreicher nationaler und internationaler, (extra-) universitärer, parlamentarischer und industrieller Einrichtungen angewiesen. In Niedersachsen kooperieren hier das Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin (ITEM) in Hannover, das Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung in Braunschweig und die Medizinische Hochschule Hannover. Eine so verzahnte Erforschung der Krankheitsmechanismen und der Eigenheiten der Erreger geht der Erprobung von antiinfektösen

Medikamenten voraus, bevor sie in die „Phase 3“ der klinischen Prüfung gehen. In „translatationaler Forschung“ werden Laborergebnisse in die klinische Beobachtung „übersetzt“. Diese Forschung bereits muss ethische Prinzipien (die drei Grundprinzipien klinischer Medizin: die Achtung der Autonomie des Patienten, das Prinzip des Nutzens und das Nicht-Schaden-Prinzip) und juristische Regularien der Anwendung neuer Pharmaka am Menschen beachten, bevor eine Erprobung zum ersten Mal am Menschen gestartet wird. Das gilt für die Einführung neuer präventiver, diagnostischer und therapeutischer Maßnahmen wie für die Erprobung von Medikamenten für Patienten mit seltenen Krankheiten. Der Prozess folgt auch dem gültigen Arzneimittelgesetz, das in besonderer Weise auf den Schutz der Probanden klinischer Studien zielt.

Als Beispiel schildert Kalinke die Prüfung des agonistischen monoklonalen Antikörpers TGN1412, der aufgrund seiner Wirkung auf Lymphozyten bei Autoimmunkrankheiten und Blutkrebs eingesetzt werden sollte. Der Wirkstoff wurde von Affen gut vertragen, ohne dass Zeichen toxischer, hyperergischer oder immun-systemischer Nebenwirkungen, auch nicht am kardiovaskulären oder respiratorischen oder dem Zentralnervensystem aufgetreten wären. Die gewählte Dosis wurde als nebenwirkungsfrei erachtet, bevor an acht gesunden Probanden (sechs Verum- und zwei Placebo-Prüfungen) gleichzeitig das Medikament eingesetzt wurde. Bereits wenige Minuten nach Infusion traten Kopfschmerzen, Fieber, Erbrechen und Symptome einer schweren Entzündungsreaktion auf (cytokine-release-syn-drome), die wenige Stunden später in ein Multiorganversagen mündete (bei einigen Personen mit Beatmungserfordernis, ohne Todesfälle, aber mit langen Klinikaufenthalten). Das Committee for Medicinal Products for Human Use zog daraus die Konsequenz verschärfter Richtlinien der toxikologischen Prüfung neuer Substanzen, die für den Einsatz als Heilmittel vorgesehen sind. Risiken von Nebenwirkungen können aus der unzureichenden Kenntnis des Wirkmechanismus, der Zielstrukturen und der Übertragbarkeit von Tierversuchen auf den Menschen herrühren. Es bleibt aber die Frage, ob strikte Leitlinien der Forschung derartige desaströse Ereignisse absolut verhindern können.

Ein weiteres Instrument infektiologischer Diagnostik ist die Molekulargenetik mit Kenntnis des menschlichen Genoms. Zwar gibt es keine „1-Gen-/1-Krankheit“-Korrelation. Aber die Analyse sog. Einzel-Nukleotid-Polymorphismen“ (SNPs), d.h. natürlicher Variationen einzelner Basenpaare in der DNA-Doppelhelix kann u.U. eine unterschiedliche Infektanfälligkeit wie auch unterschiedliche Reaktionen auf Medikamente, Impfungen oder Infektionen erklären. Die Unterschiede sind z.T. durch Variationen der für biologische Wirkstoffe kodierenden DNA-/RNA-Funktion in der Synthese z.B. von Interferon IF- λ bedingt. So ließ sich eine unterschiedliche Heilungsrate bei Personen mit einer chronischen Hepatitis C unter einer Therapie mit Interferon (α) in Kombination mit Ribavirin je nach Genotyp zeigen, bedingt durch unterschiedliche Inhibition der durch Interferon induzierten anti-viralen Immunantwort. Derartige Untersuchungen führen zu der Frage der

gendiagnostisch gestützten individuellen Therapie von Krankheiten generell und von Krebsleiden im Besonderen. Prognostische Tests können eventuell zwischen Personen- oder Patientengruppen mit niedrigem bzw. hohem Risiko differenzieren. Prädiktive Tests könnten durch Aufklärung der Wirkmechanismen der Medikamente und deren Abhängigkeit von biologischen Wirkstoffen wie Interferon oder Tumor-Nekrose-Faktor (TNF α) und unterschiedlichen Response-Raten und pharmakologischen Untersuchungen der Dosisbeziehung entdecken.

Mit der Impfung gegen Infektionskrankheiten ist die Frage angesprochen, ob auch gegen Krebsleiden eine Impfung und damit eine individuelle Behandlung möglich ist. Die Stratifizierung könnte dabei auf der Ebene der gendiagnostischen Typisierung der Personen bzw. der Patienten, des Tumorgewebes und der medikamentösen Wirkmechanismen zu der gezielten Arzneimittelwahl führen. – Neue einschlägige Biomarker werden Krankheitseinheiten, die bislang aufgrund von Symptomen oder erkennbaren Ursachen diagnostiziert und klassifiziert werden, entsprechend der verbesserten Wirksamkeit neuer Medikamente mit geringeren Nebenwirkungen abgrenzen lassen; voraussichtlich mit dem Effekt der Vereinzelung mancher Krankheiten (sog. „orphan diseases“).

Der auf die Zukunft der Medizin weisende, klare Vortrag von Kalinke machte den langen Weg von der vernetzten Forschung und Dokumentation der Entwicklung anti-infektiöser Medikamente bis hin zur gendiagnostisch gestützten Individualisierung in der Aufklärung von Krankheits- und Therapie-Mechanismen deutlich.

Seuchen, d.h. sich epidemisch ausbreitende Infektionskrankheiten, machten von jeher den Menschen Angst, individuell und kollektiv. Waren es in früheren Jahrhunderten Pest, Cholera und Pocken oder besondere Formen der Grippe, so ist es seit den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts die weltweit grassierende Infektion durch das Human-Immundefekt-Virus (HIV) mit der Folge des therapeutisch kaum beherrschbaren akuten Immundefizienz-Syndroms (AIDS). Über ihre Geschichte berichtete **Prof. Dr. med. Reinhold E. Schmidt**, Medizinische Hochschule Hannover. Auf die noch unbekannte Seuche wurden die US-amerikanischen Ärzte Dr. Conant und Dr. Volberg 1981 aufmerksam, als ein bis dahin seltener Hauttumor, das Kaposi-Sarkom, gehäuft bei jüngeren Schwulen auftrat; gleichzeitig häuften sich Fälle atypischer Lungenentzündungen (durch Pneumocystis-Arten). 1983 isolierten die französischen Forscher Francoise Barré-Sinoussi und Luc Montagnier ein noch unbekanntes Retro-Virus, identisch mit dem 1984 in den USA entdeckten Human-T-Zell-Leukämie-Virus (HTLV-1), das als Ursache für das Immundefizienz-Syndrom (AIDS) angesehen wurde. Die beiden Forscher wurden 2008 mit dem Nobel-Preis ausgezeichnet. Das Virus bindet nach Eindringen in die Blutbahn an sog. CD4- und anderen Rezeptoren auf der Oberfläche von T-Lymphozyten und Makrophagen, dringt in die Zellen ein und verwandelt mittels eines eigenen Enzyms Reverse Transskriptase die RNA in DNA um. Diese wandert in den Zellkern der Wirtszellen und wird in deren DNA eingebaut. Die

Infektion der Zelle führt zur weiteren Bildung von HI-Viren und zur Zerstörung der Zellen. Infolge dessen wird die spezifische zelluläre wie auch die humorale Immunabwehr lebensbedrohlich vermindert, sodass (bei Unterschreiten einer kritischen Zahl der T-Lymphozyten) bislang apathogene Keime (Pilze, Bakterien, andere Viren) schwerwiegende Komplikationen auslösen, denen die Kranken erliegen: sei es durch die anfängliche akute Erkrankung von wenigen Monaten oder – nach einer mehr oder weniger langen „Latenzzeit“ – durch das sich i.D. etwa 10 Jahre später manifestierende, über Monate oder gar Jahre sich hinziehende Vollbild des AIDS mit opportunistischen Infektionen. Die Schwere des Krankheitsbildes hängt von der Viruslast (HIV-RNA-Kopien/ml Blutplasma) und der Zahl der CD4-T-Lymphozyten (kritischer Wert < 200 pro mm^3) ab. Das AIDS betrifft praktisch alle Organe: das Gehirn, die Augen, die gesamten Schleimhäute vom Mund bis zum After, die Lunge, das Blut und die Haut.

Die Seuche AIDS trat wohl vor den 80er Jahren zuerst in West- und Zentralafrika auf, beim Menschen vermutlich durch Infektion über Affenfleisch, bevor in den USA die ersten Patienten mit dem Vollbild der AIDS-Krankheit beobachtet wurden. Die rasante Ausbreitung durch die Mensch-zu-Mensch-Infektion über homo- und heterosexuellen Geschlechtsverkehr, in den frühen 80ern auch durch Transfusion kontaminierter Blutkonserven, durch i.v.-Drogenabusus kam es über die ganze Welt hin (bis Ende 2010) zu einer geschätzten Infektionsrate von insgesamt ca. 34 Millionen HIV-/AIDS-Infizierten bzw. -Kranken (bei Kindern erfolgt die Übertragung von der infizierten Mutter auf das Kind unter der Geburt oder über die Muttermilch) mit extremer Häufung in Afrika (22,5 Millionen).

1995 gelang mit der kombinierten anti-retroviralen Therapie (in den reichen Ländern), ein Durchbruch in der Behandlung mit einem deutlichen Rückgang der AIDS-Erkrankungen und der Todesfälle. Eine geringere Inzidenz ist auch auf verstärkte Aufklärung über den Infektionsmodus (vor allem homosexueller Geschlechtsverkehr, Drogenabusus u.a.) zurückzuführen. Nachdem anfangs wegen der hohen Kosten der spezifischen Therapie nur die reichen Länder profitierten, ist inzwischen auch in Dritte-Welt-Ländern eine Verbesserung der Versorgung mit diesen Medikamenten auch in den ärmeren Bevölkerungsschichten Afrikas, Südamerikas und Asiens mit einem Rückgang der Infektion zu beobachten. So wurde 2011 aufgrund großer, viele Länder umfassender Studien (HIV Prevention Trials Networks) gezeigt, dass die Übertragungsrate bei Paaren, in denen nur eine Person infiziert war, um 96% vermindert werden konnte. Dennoch darf der Rückgang der Infektionsrate nicht zu leichtfertiger Einstellung gegenüber dieser noch immer weltweiten Seuche veranlassen. Sie ist und bleibt eine schwerwiegende Erkrankung, die sowohl bezüglich der das AIDS ermöglichenden Lymphozytenzerstörung durch das Virus als auch bezüglich der opportunistischen Superinfektion mit schwer zu behandelnden Keimen (Tuberkulose, Toxoplasmose, *Pneumocystis carinii* u.a.) eine lebensbedrohende Gefahr.

Für Deutschland hat das Robert-Koch-Institut (Ende 2012) ca. 78.000 HIV-/AIDS-Infizierte bzw. -Kranke (63.000 ♂: 15.000 ♀) registriert. Die vor 1996 um 2.000 liegende Neuerkrankungsrate ist mit der antiretroviralen Therapie deutlich gesenkt worden. Inzwischen steigt auch die Zahl der antiviral behandelten unter den infizierten Personen auf ca. 65%. In 2010 wurden 760 Neuerkrankungen an AIDS erfasst. Die niedrigste HIV-Infektionshäufigkeit von ca. 1.500 in 2001 stieg in 2009 wieder auf ca. 2.800 an. Dies zeigt die anhaltende Gefährdung.

Das lenkt die Aufmerksamkeit auf die Verantwortung, die jeder Einzelne, die aber mehr noch die nationalen und globalen Gesundheitsversorgungssysteme in der Überwachung und Bekämpfung der Seuche haben. Schmidt zitiert am Schluss seines eindringlichen Vortrags den Philosophen Julian Nida-Rümelin „... diese Herausforderung [durch die HIV-/AIDS-Seuche] einer freiheitlichen Gesellschaft ist nur zu bewältigen, wenn wir Verantwortung nicht lediglich als Sorge um uns selbst verstehen, sondern auch um die gleiche Autonomie jeder anderen Person.“ Und Allan M. Brandt: „AIDS epidemic has provided the foundation for a revolution that pended traditional approaches to ‚international health‘“, replacing them with innovative global approaches to disease. Indeed, the HIV epidemic and the responses it generated have been crucial forces in ‚inventing‘ the ‚new global health‘”.

Hatten die drei Vortragenden schon mehrfach auf ethische Probleme in der Infektionsmedizin hingewiesen, so standen für Herrn **Priv.-Doz. Dr. med. Walter Bruchhausen**, Aachen, „*Ethische Fragen des Umgangs mit Infektionskrankheiten*“ ausdrücklich thematisch im Mittelpunkt.

Konzentriert sich die gängige medizinethische Diskussion auf Entscheidungsfragen am Lebensanfang und Lebensende, auf die Wahrung der Patientenautonomie, auf die Schweigepflicht und ethische Prinzipien in der Forschung u. ä., so durchziehen infektionsmedizinische Aspekte alle diese Problemfelder. Infektionsmedizin ist nicht ein eigenes Thema *der* Medizinethik, wohl aber Thema *in* der Medizinethik. Auch ist hier zwischen der individuell ausgerichteten Medizinethik und Public Health Ethics mit ihren kurativen bzw. präventiven Zielsetzungen zu unterscheiden. Die Bioethik entwickelte sich vor allem parallel zu neuen technischen Möglichkeiten der Medizin, die weniger die Infektionskrankheiten betrafen; sie suchte nicht zuletzt entweder abschließende gesetzliche Antworten im Sinne von Zulassung und Verboten oder aber Orientierung für ärztliches Handeln. In der Bekämpfung von Infektionen muss man sich gleichsam auf eine Kombination beider Ebenen einlassen: eine „dauerhafte Ergebnisoffenheit“ ist – ähnlich wie individuell in der klinischen Ethik – hier auch auf der Ebene staatlichen Handelns gefordert, d.h. ständige Revisionsbereitschaft und prinzipielle Unabgeschlossenheit. In der Infektionsmedizin liegen die ethischen Herausforderungen u.a. in der Spannung zwischen individuellen Rechten und dem Gemeinwohl; auch müssen bei neuen Epidemien stets im aktuellen internationalen gesetzlichen Rahmen Entscheidungen getroffen werden.

Im Weiteren widmete sich Bruchhausen vier Themenbereichen: (a) dem Recht auf (Nicht-) Wissen und der informationellen Selbstbestimmung in Entscheidungen zu infektiologischen Maßnahmen; (b) dem Umgang mit Risiken im Blick auf den Einzelnen und die Gesellschaft; (c) der Ressourcenallokation und Priorisierung in nationalen und internationalen Gesundheitssystemen und (d) sog. vertikalen und horizontalen Programmen der Seuchenbekämpfung.

Zu a): Ein Konflikt erwächst aus der Situation, dass die infizierte Person zugleich Opfer der Infektion und Täter weiterer Ansteckung sein kann. So steht die Therapie im Interesse des Kranken und der Öffentlichkeit, die Behandlung ist zugleich ursächliche, nämlich präventive Behandlung für weitere Personen. Hinter der Entscheidung zu überindividuellen Maßnahmen können international unterschiedliche weltanschauliche oder politische Voreinstellungen in ethischen Positionen stehen. Öffentliche finanzielle Aufwendungen für infektiologisch begründete Maßnahmen werden nicht durch staatliche Eingriffe geregelt; jedoch sind andere individuelle Belastungen zu beachten: die Einschränkungen durch Quarantäne, Meldepflicht, Zwangsmaßnahmen und das Risiko durch Impfungen. Sozialethische Konflikte sind wegen ihrer national unterschiedlichen rechtlichen Bedingungen meist komplexer als individualethische. Zu achten ist auf die Gefahr einer Instrumentalisierung oder gar Opferung des Individuums zugunsten eines vermeintlichen Allgemeinwohls. Diese Warnung schließt begründete Eingriffe in Grundrechte nicht aus. Hier spielt das Wissen um die eigene Infektion für das Individuum *und* für die Gemeinschaft eine große Rolle: das Wissen um die Gefährdung (Ansteckung) anderer Personen (in Kindergärten, Schule, Beruf, Partnerschaft). Der Einzelne trägt hier Verantwortung für die Gesundheit anderer. Das hat nach der Einführung des Tests auf HIV-Infektion zu heftigen Debatten geführt: Sollen und dürfen Routinetestungen oder sogar Screenings zur Senkung der Neuinfektionsrate vorgenommen werden? Betroffene Personengruppen (Schwule, Personen mit häufig wechselndem Geschlechtsverkehr etc.) wiesen darauf hin, dass für die geforderten Schutzmaßnahmen bei Sexualkontakten das Wissen um den eigenen HIV-Status unwichtig sei; eine Testung könne eher zur Diskriminierung führen. Eine schriftliche Einverständniserklärung nach ausführlicher Beratung (der „informed consent“) und die Vertraulichkeit seien Voraussetzung für jeden Test. Hier wird das Persönlichkeitsrecht des Einzelnen vor das Interesse der Gesellschaft gestellt. Mit der Möglichkeit der effektiven antiviralen Therapie wurden die Entscheidungen für den Test viel häufiger. Jedenfalls entspricht der fragile Kompromiss in dem Konflikt zwischen privaten und öffentlichen Interessen den stets revisionsbedürftigen Anpassungen der Handlungsoptionen und regulatorischen Machtkonstellationen.

Zu b): Jede Impfung birgt für den Impfling ein gewisses Risiko der Schädigung; deswegen müssen individueller und kollektiver Nutzen weitaus größer sein. Je größer die Kollektiv-Immunität, desto besser der Schutz für die nicht geimpften Personen; jedoch ist damit statistisch der Nutzen für den Einzelnen geringer,

weil das Risiko zu erkranken viel niedriger ist. Es bleibt die Aufgabe sorgfältiger Abwägung. Das alte Prinzip des „*nil nocere!*“ gilt auch hier. Impfzwang ist nur zu rechtfertigen, wenn bei fehlenden Alternativen nachweislich eine an Sicherheit grenzende Schadensverhütung erreicht werden kann. Während die wissenschaftliche Evidenz des globalen Nutzens insgesamt eindeutig für die Impfung spricht, bleiben Probleme: bei Kindern von Impfgegnern und bei für notwendig erachteter Post-Expositionsprophylaxe (PEP) durch aktive und/oder passive Immunisierung.

Aber auch jenseits des Themas Impfung ergeben sich Fragen von Zwang. Nach dem Infektionsschutzgesetz können Quarantäne und Isolierung von Erkrankten erzwungen werden, nicht aber eine Behandlung gegen den Willen. Auch kann für gefährdende Berufe (z.B. in der Gastronomie) ein Tätigkeitsverbot ausgesprochen werden wegen der möglichen Gefährdung von Personen. Bei HIV/AIDS ist die Gefahr für Gesundheitspersonal durch die medikamentöse PEP und die anti-retrovirale Therapie heute minimal. Es bleibt der Konflikt zwischen optimalem Schutz der Behandelnden und dem Selbstbestimmungsrecht der Infizierten. Bruchhausen schildert Möglichkeiten des verantwortlichen Infektionsschutzes für Gesundheitspersonal und dem Infizierten nahestehende Personen incl. Geschlechtspartner.

Zu c): Fragen der Ressourcenverteilung stellen sich auf der Mikro-, der Meso- und der Makroebene der Gesundheitsversorgung. Unumgängliche Allokationskonflikte in der Behandlung von Einzelpersonen sind auf die Makroebene staatlicher oder überregionaler Entscheidungskompetenz zu verlagern. Dennoch ergeben sich auch dort Konflikte, etwa durch die Mittelknappheit für die antivirale Therapie. Welche Berufsgruppen sollen profitieren? Dürfen im Zuge solcher Gruppenallokation z. B. Arme von vornherein vom möglichen Nutzen ausgeschlossen werden? Auch erhebt sich die Frage der Priorisierung von Infektionskrankheiten gegenüber anderen „Volkskrankheiten“ wie Diabetes, Herz-Kreislaufkrankheiten oder Krebs. Global stellen Infektionskrankheiten vor allem für Bevölkerungsgruppen mit niedrigen Einkommen noch immer die bei weitem größten Gesundheits-/Versorgungsprobleme dar.

Zu d): In diesem Zusammenhang ist auch zu entscheiden, ob „vertikale“, d.h. *krankheitsbezogene* Programme gegenüber „horizontalen“, d.h. generell *bevölkerungsbezogenen* präventiven und gesundheitssystemstärkenden Programmen Vorrang haben. Infektionskrankheiten sind klassische Ziele vertikaler Programme, sowohl therapeutisch als auch prophylaktisch. Diese haben jedoch die Gefahr in sich, dass sie mit ihrer relativen Kurzlebigkeit etablierte Strukturen der Gesundheitsversorgung stören und durch einen hohen Ressourcenverbrauch zu Lasten der horizontalen Programme gehen. Infektionskrankheiten mit hohem Ansteckungspotenzial hatten in Kolonialafrika eine lange Tradition vertikaler und horizontaler Bekämpfung. Dringend erforderlich ist die Integration vertikaler Programme in die allgemeinen Gesundheitssysteme. Das gilt neben der Tuberkulose und der Lepra besonders für die HIV/AIDS-Krankheit, die eine lebenslängliche Behandlung und dazu entsprechende Versorgungsstrukturen erfordert. – Problematisch sind

vertikale Programme auch da, wo sie ökologische Systeme stören. Gefordert ist ein global konzeptualisiertes flexibles Gesundheitssystem, in dem auch einer Ausgrenzung betroffener Gruppen durch vertikale Spezialisierung entgegenge wirkt werden kann.

Bruchhausen stellte eindringlich eine bunte Palette individual- und global-sozialethischer Probleme in ihrer vielfältigen Komplexität im Rahmen der Infektionsmedizin der Zukunft vor.

Die Vorträge wie die angeregte Diskussion haben wieder das Anliegen dieser Bioethik-Symposien deutlich gemacht: Sie wollen nicht je spezifische Fachsymposien sein sondern wollen Probleme aktueller Forschung in ihrer gesellschafts-politischen und soziokulturellen Brisanz und Komplexität zu Bewusstsein bringen – auch in der Laienbevölkerung.

Auch das Thema „Infektionsmedizin der Zukunft“ hat das weite Feld dieses Bereiches der Medizin i. w. S. von der Grundlagenforschung bis in die alltagspraktische Anwendung deutlich gemacht. Schon in den beiden ersten Vorträgen wurden die engen Grenzen labormedizinischer und epidemiologischer Forschung auf die rechtliche und individual- und sozialmedizinische und -ethische Dimension bzw. Komplexität hin überschritten. Das Spannungsfeld um den individuellen Anspruch auf Gesundheitsversorgung einschließlich des Rechtsanspruches auf Therapie und der auf das Gemeinwohl gerichteten Maßnahmen wie Seuchenbekämpfung und Impfung ist nicht nur für den Forscher sondern auch für den einzelnen Bürger – sei er gesund oder krank – eine Herausforderung. Deutlich wurde auch, wie wichtig internationale forschungs- und versorgungsrechtliche Regelungen angesichts der Globalisierung einschließlich des Tourismus sind. Gerade Infektionskrankheiten sind nicht „Sache“ des Einzelnen sondern sind gesellschaftliche Aufgaben mit organisatorischen, ökonomischen, aber auch psychologischen und kulturellen, individual- und sozialethischen Aspekten. Fragen der Verteilungsgerechtigkeit und der Menschenrechte sind angesprochen. Insgesamt also eine Herausforderung an Individuum und Gesellschaft.

Vortragsreihe im phäno

Mathe x anders

Begleitende Vortragsreihe zur Sonderausstellung „Mathe x anders. Die Magie der Formen und Muster“

Veranstaltungstage: Donnerstag, 26.09., 24. und 31.10., 07. und 14.11.2013,
jeweils 18.30 h–19.30 h

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Akademie der Wissenschaften zu Göttingen
phäno Wolfsburg
I.P.I, Wolfsburg

Veranstaltungsort: phäno Wissenschaftstheater, Willy-Brandt-Platz 1, 38440
Wolfsburg

Mathematik war 2008 das Thema der ersten Vortragsreihe, die die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen und die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft in Kooperation mit I.P.I und phäno veranstaltet hatten – anlässlich des damaligen Jahres der Mathematik. Zum 5-jährigen Jubiläum dieser inzwischen sehr populären Vortragsreihe gab es einen neuen Anlass für die Veranstalter, sich wieder mit dem Thema Mathematik zu beschäftigen: die aktuelle Sonderausstellung des phäno „Mathe x anders – Die Magie der Formen und Muster“.

Sowohl in der Ausstellung als auch in der Vortragsreihe lag der Schwerpunkt auf Geometrie und Formen. Die Vorträge illustrierten, wie Mathematik uns im Alltag begegnet und nützt – zum Beispiel bei der Zeitmessung und in der Medizin.

Samuel Patterson (26.09.2013)

Samuel Patterson wurde 1948 in Belfast, Nordirland geboren. Er studierte in Cambridge. Nach Lehrtätigkeit ebendort und in Harvard kam er 1981 als Professor der Mathematik nach Göttingen, wo er bis 2011 lehrte. Er wurde 1998 zum ordentlichen Mitglied der Akademie der Wissenschaften gewählt. Seine Interessen gelten der Anwendung der Methoden der Analysis auf diskrete Strukturen, wobei die ganzen Zahlen ein Hauptbeispiel liefern.

Sonne, Mond und Sterne – Das Ringen mit schwierigen Zahlen

Für uns heute ist der Kalender selbstverständlich, und es ist schwierig sich vorzustellen, wie Menschen ohne dieses Gerüst für das alltägliche Leben gelebt haben.

Trotzdem war die Entwicklung des Kalenders nicht nur eine mathematische Herausforderung, deren Lösung eine große intellektuelle Leistung darstellte, sondern auch von erheblicher religiöser und politischer Bedeutung, wie man in der Frage der Bestimmung des Osterfestes erfährt. Diese Frage trennt bis heute die Ost- und Westkirchen.

Die Grundfrage besteht darin, wie man ganzzahlige Lösungen zu Problemen findet, wo eine durchaus nicht ganzzahlige Antwort naheliegt.

Die Methoden, die für die Zwecke der abstrakten Zahlentheorie (Gauß, Dirichlet, Minkowski) entwickelt wurden, werden heute als sehr praktische Mathematik angewandt und weiterentwickelt.

Heiko Harborth, TU Braunschweig (24.10.2013)

Heiko Harborth ist seit 1972 Professor für Mathematik an der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsgebiete sind Diskrete Geometrie, Kombinatorik, Zahlentheorie und Graphentheorie. Seit 1992 ist er Mitglied in der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Was sagen uns mathematische Figuren?

Auf Plakaten, als Firmenlogos und in Briefköpfen werden mathematische Figuren als Blickfang benutzt. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen dienen sie als beispielhafte Veranschaulichungen von gelösten und ungelösten mathematischen Fragestellungen. Es wurden einige Figuren mit ihrem mathematischen Hintergrund vorgestellt.

Das Bild zeigte den nach dem Referenten benannten Harborth Graphen (1986), der das kleinste Beispiel eines Streichholzparagraphen ist, in dem jeder Knoten genau vier Nachbarn hat (er ist 4-regulär). Wie der Name andeutet, sind Streichholzgraphen durch das Legen von Streichhölzern jeweils gleicher Länge in der Ebene konstruierbar. (Das heißt, die Kanten haben Einheitslänge und der Graph ist planar).

Heinz-Otto Peitgen, Jacobs University Bremen (31.10.2013)

Heinz-Otto Peitgen war von 1977–2012 Professor für Mathematik an der Universität Bremen und parallel dazu von 1985–1991 Professor für Mathematik an der University of California und von 1991–2012 Professor für Mathematik und Biomedizinische Wissenschaften an der Florida Atlantic University. Er war von 1985–2012 Gründer und Leiter des Fraunhofer Instituts MEVIS, Institut für bildgestützte Medizin und ist seit Beginn dieses Jahres Präsident der Jacobs University Bremen.

Mathematik fürs Leben

Mathematik wird gemeinhin als die Wissenschaft der Zahlen verstanden. In diesem Ausflug erlebten wir ein anderes Bild. Wir reisten in die Welt der Medizin und erlebten, wie Mathematik in der Tumorchirurgie Probleme lösen kann, die selbst den besten medizinischen Experten nicht gelingen können. Damit werden neue Wege der Behandlung eröffnet und bekannte chirurgische Behandlungswege risikoärmer gemacht.

Mathematik ist also mehr als ein Spiel mit Zahlen. Mathematik ist selbst in der Medizin Motor für Innovation und Fortschritt.

Harald Löwe, TU Braunschweig (07. November 2013)

Harald Löwe ist Mathematikdozent an der Technischen Universität Braunschweig. Seine Forschungsgebiete sind Geometrie sowie Anwendungen der Geometrie im Ingenieurwesen. Als Direktor der „Mathe-Lok“ führt er seit 2005 mathematische Projekte für Schülerinnen und Schüler durch.

Die Geschichte der Eulerschen Polyederformel

Bis tief in die Geschichte der Kulturen lässt sich das Interesse der Menschen an regelmäßigen Körpern zurückverfolgen. Neben der Kugel waren es vor allem die Polyeder, also geradflächig begrenzte Körper wie Würfel oder Pyramide, die seit Euklid auch Mathematiker immer wieder faszinierten. Aber nicht jeder der vielen Erkenntnisse über Polyeder schaffte es in die „Top Ten“ der mathematischen Sätze – dieses Privileg genießt vor allem die „Polyederformel“ von Euklid, die durch ihre Einfachheit und Schönheit zu den Highlights der Mathematik zu rechnen ist. Kurz (und, wie der Vortrag zeigte, falsch) ausgedrückt lautet diese Formel: addiert man die Anzahlen der Ecken und der Flächen eines Polyeders und zieht anschließend die Anzahl seiner Kanten ab, so ist das Ergebnis stets 2.

Der Vortrag spürte der Geschichte des Beweises nach und erläuterte, an welchen Tücken auch namhafte Mathematiker immer wieder scheiterten, bis endlich die neu entstandene „Algebraische Topologie“ durch Abstraktion einen überraschend einfachen Beweis bieten konnte.

Rainer Löwen, TU Braunschweig (14.11.2013)

Rainer Löwen, Jahrgang 1947, ist seit 1987 Professor für Mathematik an der Technischen Universität Braunschweig. Er beschäftigt sich mit verschiedenen Zweigen der Geometrie sowie außerfachlich mit Fotografie und Musik. Seit 2013 ist er Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Kristalle und Quasikristalle

Die ästhetisch befriedigenden geometrischen Formen der Kristalle erklären sich daraus, dass ihre Atome in Form eines regelmäßigen Gitters im Raum angeordnet sind. Daraus ergibt sich die Konsequenz, dass ein echter Kristall niemals die Gestalt eines Dodekaeders (das ist einer der fünf regelmäßigen „platonischen Körper“) haben kann. Dennoch wurden 1984 kristalline Substanzen gefunden, die dieser geometrischen Tatsache zu widersprechen scheinen. Die geometrischen Argumente sind leicht zu verstehen. Sie und die Auflösung des scheinbaren Widerspruchs waren Gegenstand des Vortrags.

Mathe x anders – Die Magie der Formen und Muster

Sonderausstellung im phäno vom 04. April 2013 bis 05. Januar 2014

Eine „atmende“ Riesenkugel – die sogenannte „Expanding Sphere“ – schwebte im phäno Wolfsburg über der Sonderausstellung „Mathe x anders“. Die spezielle, faltbare Kugelkonstruktion veränderte ihren Durchmesser stufenlos von etwa 1,30 m auf bis zu 4,50 m. Insgesamt waren in der Sonderschau zum Thema Mathematik rund 30 Phänomene zu sehen – die erste Sonderausstellung des phäno mit einem Schwerpunkt auf geometrischen Formen und Körpern in den verschiedensten Facetten.

Auf dreidimensionalen Sternen klettern, Figuren drehen, Origami-Figuren falten oder seltsame Körper wie Oloide zum Taumeln bringen, all dies machte Spaß und forderte zu gedanklichen Höchstleistungen heraus! Ein Laserstrahl, der sogenannte „Feuerring“, zerschnitt komplexe geometrische Körper optisch und offenbarte ihre Grundstruktur. Aus geraden Fäden ließen sich Hyperboloide – eine Art Zylinder mit Wespentaille formen und aus einer geschwungenen zweidimensionalen Figur entstand durch Rotation ein Abbild einer Glühbirne.

First Conference of Scientific Cooperation between Lower Saxony and Israel

Veranstaltungstage: 06. und 07. Oktober 2013

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
c/o Prof. Dr. Thomas Scheper
Con2013@iftc.uni-hannover.de

Veranstaltungsort: Leibnizhaus, Hannover (Germany)

Sponsoren: Ministerium für Wissenschaft und Kultur Niedersachsen
(MWK), Freundeskreis der Leibniz Universität Hannover,
Sartorius AG, Symrise AG

Since 1977 the *Ministry of Science and Culture of Lower Saxony* has funded research projects between universities and research institutes from Lower Saxony with the Hebrew University or the Technion in Israel. Due to this funding many highly innovative research projects have been initiated and transformed into intensive ongoing research collaborations between both countries. This research funding is the basis of stable and fruitful partnerships between researchers from Lower Saxony and Israel. During the last few years, early-stage scientists from both countries have been involved. The involvement of the younger generation will ensure a fruitful future collaboration between both countries.

The “*First Conference of Scientific Cooperation between Lower Saxony and Israel*” is intended to be a platform for the presentation of ongoing research collaborations. Here the latest results will be presented and discussed with a broader audience. New collaborations could be initiated and younger researchers attracted to exciting new project ideas. This conference will be set up to show the high scientific level of collaborations in various areas of science and humanities. Additionally, younger researchers will have the opportunity to find partners for future collaborations by presenting their new ideas. The conference will be held every two years and will become a recurring part of the research funding activities of Lower Saxony.

The research partners in each project will have the chance to present results via oral or poster presentations. A certain number of travel grants for oral presenters and young investigators will be available. The submitted abstracts will be evaluated by a

scientific committee. During the poster presentation, young researchers from both countries will have the chance to present themselves and their research ideas in order to gain valuable contacts with researchers from the partner country. This partnering will be further developed within the next few conferences.

This is envisaged to be the second pillar of the biannual conference. The “*First Conference of Scientific Cooperation between Lower Saxony and Israel*” was organized by the Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (President Prof. Dr. Joachim Klein). The scientific organizing committee of the first conference consists of Prof. Dr. Yuval Shoham, Technion, Haifa; Prof. Dr. Shimshon Belkin, Hebrew University Jerusalem; Prof. Dr. Joachim Wolschke-Bulmahn, Leibniz Universität Hannover and Prof. Dr. Thomas Scheper, Leibniz Universität Hannover.

Sunday, 06.10.13

12:45 Welcome Notes

13:00 Uncovering the regulatory network controlling aggressive breast cancer subtype identity, U. Lehmann, J. Rößler, R.Z. Granit, I. Ben-Porath

13:30 Novel phosphorylation sites on immune adaptor proteins fine tune immune responsiveness, D. Yablonski, J. Wienands

14:00 RNA-protein interactions during viral infections and inherited immunodeficiencies, J. Böhne, Y. Mandel-Gutfreund

14:30 Perturbation of intestinal epithelial homeostasis by enteropathogenic *E. coli*, I. Rosenshine, M. Hornef

15:00 Mechano-sensitivity of human mesenchymal stem cells, F. Rehfeldt, A. Zemel

16:00 Personal care products as source for micropollutants in greywater – identification, quantitation and on-site treatment, O. Olsson, Y. Dubowski, E. Friedler, K. Kümmerer

16:30 The effect of biofilms on hydraulic properties of porous media, W. Durner, S.C. Iden, A. Furmann, R. Rosenzweig, H. Rosenkranz, U. Shavit

17:00 Real-time monitoring of N-species isotopologues by FTIR spectroscopy – a novel tool to investigate short-term isotopic dynamics and N_2O formation in soil, R. Linker, N. Wrage, S. Avrahami, R. Well, H. Flessa, Y. Dubowski, A. Shavit

17:30 The role of dispersive stresses in canopy flow models, K. Koll, U. Shavit, S. Asher, S. Niewerth

18:00 R&D Cooperation between Israel and Germany – a permanent challenge?
H. Eikenberg

18:30 Various Notes

Monday, 07.10.13

08:30 Heroes and role models in Germany and Israel, G. Yair, Y. Girsh, S. Alyan,
H. Hues, E. Or

09:00 Development of relationships during infancy – Risk and protective factors
in minority and majority families in Germany and Israel, H. Keller,
H. Otto, O. Tishby, D. Roer-Strier

09:30 Transfer between parents and adult children in migrant families from the
former Soviet Union – Germany and Israel compared, C. Vogel, S. Shiovitz-
Ezra

10:30 Bridging between homogeneous and heterogeneous catalysis, R. Abu-
Reziq, A. Kirschning

11:00 Investigation of novel titanium compounds as potential anticancer drugs,
J. Schur, C.M. Manna, A. Deally, R.W. Köster, M. Tacke, E.Y. Tshuva, I. Ott

11:30 Development of drugs against malaria and leishmaniasis, two fatal tropical
infectious diseases, C.L. Jaffe, R. Dzikowski, C. Kunick

13:30 Cardiac tube morphogenesis: what can we learn from flies, A. Paululat,
T. Volk

14:00 Identification and characterization of novel factors required for the forma-
tion of functional cilia, M. Stauber, M. Weidemann, A. Gossler, E. Bengal

14:30 The different roles of the ubiquitin-like protein SUMO in cellular regu-
lation, A. Biram, K.B. Meir, M. Breker, M. Schuldiner, R. Geiss-Frie-
lander, T. Ravid

15:30 Interfacial oxygen transport in metal oxide superlattices, M. Schulz,
H. Fritze, A. Rothschild

16:00 Physical phenomena related to the adsorption of selfassembled-monolayers
(SAM) on the surface of liquid metals, A. Iakovlev, M. Müller, B. Haimov,
B. Pokroy

- 16:30 Production of algal biomass from industrial CO₂-rich flue 2 gasses for biofuel and valuable compounds, R. Armon, T. Friedl, F. Kirznher, A. Kryvenda, C. Müller, R. Tischner
- 17:00 Rust to riches: Iron oxide photoanodes for solar-powered water splitting, A. Rothschild
- 17:30 Concluding Remarks
- 18:00 BIOTECHNICA Evening Event

Akademische Feierstunde 70 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Veranstaltungstag: 27.11.2013

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Veranstaltungsort: Neuer Senatssaal der TU Braunschweig

Begrüßung

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein,
Präsident der BWG

Dr. Beate Nagel,
Kommissarische Leiterin der Universitätsbibliothek Braunschweig

Podiumsgespräch

„Die Wissenschaftlichen Akademien – einst und jetzt“

Einführung und Gesprächsleitung

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein
im Gespräch mit

Prof. Dr. Benno Parthier,
Leopoldina/Halle

Prof. Dr. Christian Starck,
Akademie der Wissenschaften, Göttingen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Klaus Weinert,
acatech/München

Schlussworte und Einladung zum Empfang

Prof. Dr. Dietmar Brandes,
Vizepräsident der BWG

Ansprache des Präsidenten zur Akademischen Feierstunde am 27.11.2013 im Neuen Senatssaal der TU Braunschweig

PROF. DR. DR. H.C. JOACHIM KLEIN, PRÄSIDENT

Meine sehr geehrten Damen und Herren,
verehrte Gäste und
liebe Mitglieder der BWG,

zur heutigen Akademischen Feierstunde darf ich Sie im Namen der BWG sehr herzlich begrüßen und Ihnen für Ihr so zahlreiches Erscheinen danken: Sie zeigen damit einmal mehr, wie Sie unsere an die Öffentlichkeit gerichteten Aktivitäten mit Interesse begleiten.

Im Mittelpunkt unserer heutigen Veranstaltung steht die Vorstellung eines Buches mit dem Titel:

1943–2013. 70 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Es ist also ein Thema der Geschichte, das uns heute zusammenführt, und zwar der Gründungs- und Lebensgeschichte unserer eigenen Institution.

Wir leben in einer Zeit, in der die Erinnerung an historisch bedeutsame Daten durchaus populär ist. Das von der Stadt Braunschweig mit vielen unterschiedlichen Veranstaltungen geprägte Programm zur Erinnerung an das Jahr 1913 ist dafür ein aktuelles Beispiel. Und das Jahrespaar 1914/2014 lässt noch wesentlich mehr erwarten. Dabei scheint die Entfernung des Erinnerungsjahres von dem Jahr des Ereignisses erst ab einer gewissen Distanz eine offene Bewertung zu erlauben. Eine Distanz von 100 Jahren – das entspricht drei Generationen – ist dafür offenbar prädestiniert.

Für die BWG schauen wir mit dem Gründungsjahr 1943 heute auf 70 „Lebensjahre“ zurück. Ein Blick in die Presse dieser Zeit zeigt, wie die Menschen bemüht sind, ein fast normales Leben zu gestalten, während der Staat an den Fronten in Ost und West vor dem Zusammenbruch steht. Offenbar gehörte es auch zu dieser heute fast unglaublichen Normalität, dass sich Wissenschaftler und Politiker zur Gründung einer „Wissenschaftlichen Gesellschaft“ zusammenfinden konnten. Georg Müller hat diese faszinierende Gründungsaktivität in schwieriger Zeit in einem Aufsatz in unseren Abhandlungen (Band 47) bereits einmal genauer analysiert und beschrieben.

Worin besteht nun der Mehrwert eines Buches, das sich im Jahr 2013 der 70jährigen Geschichte der BWG widmet? Ich meine, dass es dafür vier gute Argumente gibt:

1. Wir können aus der Feder eines Historikers die Gründungsgeschichte mit größerer „Tiefenschärfe“ nachvollziehen und den eindeutig wissenschaftlichen und unpolitischen Anspruch dieser Gründung belegen.
2. Wir erfahren, wie sich eine „Wissenschaftliche Gesellschaft“ über 7 Jahrzehnte mit formalen und inhaltlichen Fragen auseinandersetzt und ihr heutiges Erscheinungsbild und Profil formt.
3. Mit ihren Wechselwirkungen zu den Universitäten in Niedersachsen trägt die BWG auch zur Entwicklung des Wissenschaftsprofils des Landes mit einem Schwerpunkt in den Ingenieurwissenschaften bei.
4. Diese Geschichte der BWG zeigt auch die Bedeutung einer Institution, die wesentliche Beiträge zur Vernetzung der Wissenschaft und zum Brückenschlag der Wissenschaft zur Öffentlichkeit leistet.

1943–2013: 70 Jahre BWG ist auch eine Bilanz, auf die wir nicht ohne Freude über das Erreichte blicken können. Dies ist für die BWG nun auch ein willkommener Anlass, um vielfältig Dank zu sagen an alle, die sie fördern und in innerer und äußerer Verbindung zu ihr stehen.

Wenn ich mit der Förderung beginne, so richtet sich mein Dank vorrangig an das Land Niedersachsen: Dem Land Braunschweig entstammend, sind wir im Land Niedersachsen angekommen, das uns auch im Status einer Körperschaft des Öffentlichen Rechts – mit einer vom Staat genehmigten Satzung in der Struktur einer Akademie der Wissenschaften – zuverlässig seit vielen Jahren die finanzielle Basis unserer Arbeit sicherstellt.

Sehr wichtig ist mir auch der Dank an unsere Stadt Braunschweig für ihren Beitrag zur Grundfinanzierung sowie zur wirksamen Partnerschaft, der wir uns bei vielen Veranstaltungen im öffentlichen Raum erfreuen dürfen.

Meinen Dank nach Innen richte ich an all unsere Mitglieder, die der BWG in den vergangenen 70 Jahren angehörten und angehören. Hauptamtlich an den Universitäten in Braunschweig, Clausthal, Hannover, Göttingen, Osnabrück, Hildesheim und an den zahlreichen außeruniversitären Forschungsinstituten der Region tätig, bildet ihre ehrenamtliche, auf persönlicher Berufung beruhende Mitgliedschaft die wesentliche Basis für die Arbeit der BWG im Inneren und in den Außenbeziehungen.

Mit dem aktuellen Verständnis vom Wirken einer Akademie der Wissenschaften verbindet die BWG seit vielen Jahren auch eine intensive Wechselwirkung zur Gesellschaft. Für unsere Aktivitäten zur Stärkung des Dialogs der Wissenschaft und der Öffentlichkeit war es auch wichtig, am Aufbau eines lebenden Netzwerks der Wissenschaftlichen Institutionen der Region mitzuwirken. Diesen Institutionen

danke ich für die gute Kooperation und der Öffentlichkeit für die breite Resonanz, die wir in vielen Veranstaltungen erfahren durften.

Abschließend möchte ich dann allen Personen und Institutionen danken, die ganz konkret unsere Buchpublikation ermöglicht und realisiert haben.

Eine großzügige finanzielle Förderung durch die „Stiftung Braunschweigischer Kulturbesitz“ und die „STIFTUNG NORD/LB · ÖFFENTLICHE“ schuf die Basis für ein Projekt, das einen Beitrag zur kulturellen Geschichte des Landes liefert.

Den Autoren Daniel Weßelhöft und Oliver Matuschek verdanken wir eine wissenschaftlich basierte, aber auch lebendige Darstellung einer Gründungsgeschichte in problematischer Zeit und das wechselvolle Geschehen der folgenden Jahrzehnte.

Seitens der BWG wurde dieses Projekt von einem wissenschaftlichen Beirat begleitet, dem ich für seine konstruktiven und kritischen Beiträge herzlich danke.

Schließlich danke ich dem appelhans-Verlag für die sorgfältige Edition und so ansprechende Drucklegung und Gestaltung unseres „Geschichtsbuches“.

Wenn ich nun das Wort an Frau Dr. Nagel als Leiterin der Universitätsbibliothek weitergebe, so tue ich dies mit doppelter Motivation. Zum einen danke ich der Universitätsbibliothek für die Partnerschaft bei der Ausrichtung dieser Veranstaltung. Zum anderen – und das ist ein sehr wichtiges Resultat unseres Projektes – kann ich dem Universitätsarchiv, das ja eine Abteilung der Universitätsbibliothek ist, mit Blick auf die Geschichte der BWG eine Dokumentation übergeben, und nicht nur, um dort wohl verwahrt, sondern auch wohl geordnet der weiteren wissenschaftlichen Arbeit zugänglich gemacht zu werden.

Vielen Dank, dass Sie mir zugehört haben.

Schlussworte zur Feierstunde am 27.11.2013

PROF. DR. DIETMAR BRANDES, VIZEPRÄSIDENT DER BWG

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

verehrte Angehörige, Freunde und Förderer der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft!

Ihnen allen, die Sie Ihre Verbundenheit zur BWG durch Ihre Anwesenheit zeigen, möchte auch ich herzlich danken. Ein besonderer Dank gilt den Vertretern der Leopoldina, der Göttinger Akademie der Wissenschaften und der acatech. Ebenso danke ich unseren Förderern, der Stiftung Nord/LB Öffentliche und der Stiftung Braunschweigischer Kulturbesitz, für die großzügige Unterstützung unseres Projekts.

Unsere Akademische Feierstunde wäre aber gar nicht möglich ohne die Aufarbeitung von 70 Jahren eigener Geschichte. Hierfür gilt der herzliche Dank den Autoren, Daniel Weßelhöft, der das Erscheinen seines Werkes nicht mehr erleben konnte, und Oliver Matuschek, der sich in kurzer Zeit sehr intensiv einarbeiten konnte und dem das Werk – aufbauend auf der kritischen Analyse von Daniel Weßelhöft – seine jetzige Gestalt weitgehend verdankt. Der Druck des Buches erfolgte mit Mitteln der Freunde der BWG, hierfür sei allen Spendern gedankt.

Die Analyse der Gründungsgeschichte ergab, dass trotz der Gründung im Jahr 1943 weder in Satzung noch in den Gründungsansprachen Zugeständnisse an eine nationalsozialistische Sprache oder den Nationalsozialismus selbst erfolgten. Auch wenn wir bislang schon hiervon ausgingen, so sind wir doch erleichtert, dass die BWG vor 70 Jahren als eine eindeutig der Wissenschaft verpflichtete Gesellschaft gegründet wurde. In den ersten Jahrzehnten ihrer Existenz hat die BWG in mehreren Etappen wesentliche Strukturen aufbauen können: So wurde von Anfang an die Bedeutung der technischen Wissenschaften herausgestellt und frühzeitig das Konzept interdisziplinärer Arbeitsgruppen entwickelt. Es war die BWG, die zuerst eine Klasse für Technische Wissenschaften einrichtete. Seit 1953 ist die BWG Körperschaft öffentlichen Rechts, was sie deutlich aus dem Kreis vieler anderer wissenschaftlicher Gesellschaften heraushebt. Sie hat längst eine eigene Unterkunft und einen eigenen, wenn auch schmalen Etat.

Eine Hauptaufgabe der BWG ist die Förderung des fächerübergreifenden Denkens. Der interdisziplinäre Diskurs wird einmal in den Klassensitzungen, in wesentlich erweitertem Maße dann auf den Plenarsitzungen, vor allem aber während der Thementage erreicht, allerdings zunächst nur BWG-intern. Zur Bearbeitung fachübergreifender Fragestellungen wurden Kommissionen gebildet, von denen

ich die „Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte“, die „Kommission für Technik und Umwelt“, die schon vor 19 Jahren in Clausthal ein Symposium zur Verringerung des Kohlendioxid-Ausstoßes veranstaltete, sowie die „Kommission für Münzfunde und Geldgeschichte“ erwähnen möchte. Seit 2004 werden in Kooperation mit der Akademie für Ethik in der Medizin (Göttingen) und anderen Partnern die Symposien zur Bioethik veranstaltet. Auf ihnen werden die Themen jeweils vom Standpunkt der Grundlagenforschung, der klinischen Anwendung, der juristischen und gesellschaftlichen Implikationen behandelt.

Waren unsere aus dem Schriftentausch resultierenden Tauschbestände zuerst nur als Depositum in der Universitätsbibliothek aufgestellt, so ist die UB Braunschweig gemäß Niedersächsischem Hochschulgesetz (NHG) seit 1991 zugleich die Bibliothek der BWG. Zunächst wurde „nur“ der Tausch mit auswärtigen Akademien und Universitäten durchgeführt, seit kurzem sind alle Aufsätze unserer Periodika über die Digitale Bibliothek Braunschweig weltweit verfügbar. Unser Archivgut wird im Universitätsarchiv der TU Braunschweig verwahrt und erschlossen, das wiederum eine Abteilung der Universitätsbibliothek Braunschweig ist. Dies ist auch der Grund für die gemeinsame Einladung zur heutigen Veranstaltung.

Die BWG verleiht jährlich die Gauß-Medaille und ist gemeinsam mit weiteren Partnern an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises sowie des Bürgerpreises für herausragende studentische Leistungen beteiligt. Besonders wichtig erscheint uns gerade die Förderung junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Junge Akademien sind derzeit en vogue; auch wir überlegen, wie wir junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der wichtigsten Phase ihres Lebens fördern und auch temporär in die BWG einbinden können.

Bereits in den ersten Nachkriegsjahren war die BWG mit einer beachtlichen Breite von Themen durch Vorträge ihrer Mitglieder in der Region präsent. Ab 2000 wurde auf dieser etwas verschütteten Tradition mit großem Erfolg weitergebaut: Die Akademievorlesungen im Schloss und die gemeinsam mit der Göttinger Akademie der Wissenschaften im Wolfsburger phaeno veranstalteten Vorträge sprechen für sich. Ebenso gibt es gemeinsame Veranstaltungen mit dem Braunschweigischen Landesmuseum und mit dem Institut für Braunschweigische Landesgeschichte. Hier sind wir auf dem richtigen Wege und fühlen uns auch vom Bundespräsidenten Gauck bestätigt, der im Oktober auf der Jahresversammlung der Leopoldina die Akademien darum bat, sich der Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse stärker zu widmen, noch stärker zu widmen als bisher.

Die heutige Feierstunde ist also rundum ein freudiger Anlass, wir können auf dem bislang errichteten Fundament gut weiterbauen, wenn die Bäume auch nicht in den Himmel wachsen werden. Aber: die Region Braunschweig ist die wissenschaftsstärkste Region der EU, und noch sind die Potenziale der Zusammenarbeit mit den außeruniversitären Forschungseinrichtungen im Braunschweiger Raum nicht ausgeschöpft!

Ihnen allen, meine Damen und Herren, darf ich für Ihre Anwesenheit, für Ihr Interesse an der Wissenschaft danken. Ebenso möchten wir allen Spendern und Sponsoren noch einmal herzlich danken, sowie denen, die sich um das Gelingen der Veranstaltung verdient gemacht haben: stellvertretend für alle möchte ich Frau Petersen und Frau Mumcu von der Geschäftsstelle der BWG erwähnen.

Wir laden Sie jetzt gern zu einem kleinen Imbiss ein und freuen uns auf viele anregende und fächerübergreifende Gespräche bei einem Glas Wein. Ich wünsche Ihnen einen weiterhin schönen Nachmittag, seien Sie herzlich willkommen und fühlen Sie sich bei uns wohl.

Abhandlungen

Ein Beitrag zur Numerik von Polynomen und Polynommatrizen

SIGURD FALK

Echternstr. 46, D-38100 Braunschweig

Zusammenfassung

Es werden einige auch für mehrfache Nullstellen bzw. Eigenwerte quadratisch konvergierende Algorithmen bereitgestellt. Dabei dienen die von MATLAB ausgeworfenen Näherungen als Startwerte. Acht numerische Beispiele demonstrieren die Zuverlässigkeit dieser Vorgehensweise.

1. Aufgabenstellung

Vorgegeben ist die Matrizen-Eigenwertgleichung

$$\mathbf{y}^T \mathbf{F}(\lambda) = \mathbf{o}^T; \quad \mathbf{F}(\lambda) \mathbf{x} = \mathbf{o} \quad (1.1)$$

mit der Polynommatrix der Ordnung n vom Grade p

$$\mathbf{F}(\lambda) = A_0 + A_1 \lambda + A_2 \lambda^2 + \dots + A_p \lambda^p; \quad \det A_p \neq 0. \quad (1.2)$$

mit im allgemeinen komplexwertigen Koeffizientenmatrizen A_0 bis A_p .

Ihre Eigenwerte

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m; \quad m = p \cdot n \quad (1.3)$$

werden im Folgenden als Nullstellen des charakteristischen Polynoms

$$\det \mathbf{F}(\lambda) = f(\lambda) = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + \dots + a_m \lambda^m \quad (1.4)$$

berechnet mittels einer Padé-Funktion¹

Eingegangen: 27.04.2013.

¹ Henri Eugene Padé, französischer Mathematiker 1863–1953

$$p(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{z(\lambda)}, \quad (1.5)$$

wo $z(\lambda)$ ein Polynom vom Grad $\leq m$ ist.

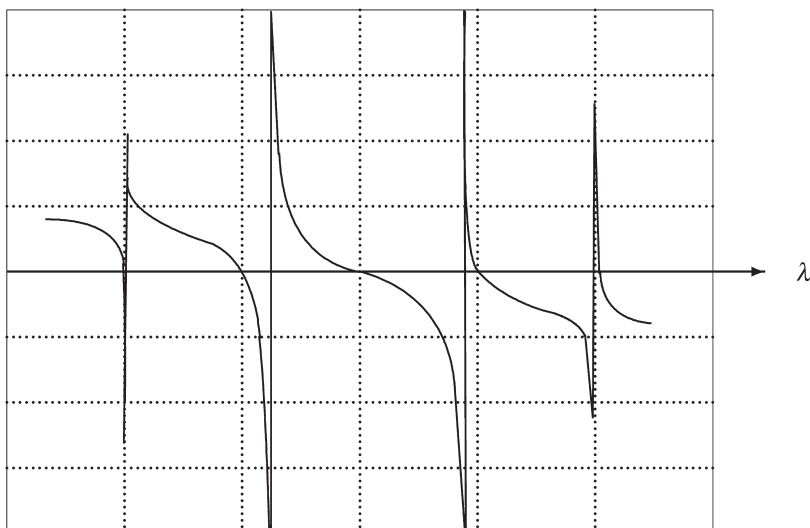


Bild 1: Typischer Verlauf einer Padé-Funktion im Reellen.

Die spezielle Padé-Funktion mit $z(\lambda) = -f'(\lambda)$, somit

$$p(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{-f'(\lambda)} \quad (1.6)$$

zeichnet sich durch die folgende Eigenschaft aus. Das Polynom $f(\lambda)$ besitze eine Nullstelle a der Vielfachheit v , damit gilt die Darstellung

$$f(\lambda) = (\lambda - a)^v \cdot z(\lambda); \quad z(a) \neq 0. \quad (1.7)$$

Es folgt

$$f'(\lambda) = v(\lambda - a)^{v-1} \cdot z(\lambda) + (\lambda - a)^v \cdot z'(\lambda), \quad (1.8)$$

oder auch

$$f'(\lambda) = (\lambda - a)^{v-1} \left[\underbrace{v \cdot z(\lambda) + (\lambda - a) \cdot z'(\lambda)}_{\varphi(\lambda)} \right], \quad (1.9)$$

wo

$$\varphi(a) = v \cdot z(a) + 0 \neq 0 \quad (1.10)$$

ist.

Damit wird die Padé-Funktion

$$p(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{-f'(\lambda)} = \frac{(\lambda - a)^v \cdot z(\lambda)}{-(\lambda - a)^{v-1} \cdot \varphi(\lambda)} = (\lambda - a) \cdot \frac{z(\lambda)}{-\varphi(\lambda)}. \quad (1.11)$$

Es gilt demnach die **Aussage**:

Die Padé-Funktion (1.6) besitzt ausschließlich einfache Nullstellen.

2. Die Algorithmen

Für den Anwender kommen nur solche Algorithmen in Betracht, die auch bei mehrfachen Nullstellen sicher zum Ziel führen. Das auf Newton zurückgehende Tangentenverfahren scheidet daher von vornherein aus. In praxi bewährt haben sich dagegen die drei folgenden Typen.

2 a) Grundlage ist die Padé-Funktion (1.6). Damit wird

$$\Lambda_{j+1} = \Lambda_j + p(\Lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

2 b) Grundlage ist die nach Halley benannte Funktion

$$h(\lambda) = \frac{p(\lambda)}{1 + p(\lambda) \cdot q(\lambda)}, \quad (2.2)$$

wo

$$q(\lambda) = \frac{f''(\lambda)}{f'(\lambda)} \quad (2.3)$$

ist. Damit wird

$$\Lambda_{j+1} = \Lambda_j + h(\Lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

2 c) Grundlage ist die Familie von Testpolynomen

$$f_k(\lambda) = a_0 + (-1)^k \cdot a_2 \lambda^2 + (-2)^k \cdot a_3 \lambda^3 + \dots + (1-m)^k \cdot a_m \lambda^m \quad (2.5)$$

mit

$$k = 1, 2, \dots, v, \quad (2.6)$$

wo v die Vielfachheit der angesteuerten Nullstelle ist.

Es besitze das vorgegebene Polynom $f_0(\lambda)$ eine Nullstelle $\tilde{\lambda}$ der Vielfachheit v , dann besitzt jede der Padé-Funktionen

$$P_1(\lambda) = \frac{f_0(\lambda)}{f_1(\lambda)}; \quad P_2(\lambda) = \frac{f_1(\lambda)}{f_2(\lambda)}, \quad \dots \quad P_v(\lambda) = \frac{f_{v-1}(\lambda)}{f_v(\lambda)} \quad (2.7)$$

diese als einfache Nullstelle. Mit

$$p_v(\lambda) = P_v(\lambda) \cdot \lambda \quad (2.8)$$

lautet der Algorithmus

$$\Lambda_{j+1} = \Lambda_j + p_v(\Lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

oder auch

$$\Lambda_{j+1} = [1 + P_v(\Lambda_j)] \cdot \Lambda_j; \quad j = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Alle drei Algorithmen konvergieren quadratisch.

3. Sondierung

Die Sondierung dient der Bereitstellung von Näherungswerten, mit denen die Algorithmen gestartet werden.

Hier sind drei Fälle zu unterscheiden.

3 a) Die Koeffizienten des vorgegebenen Polynoms (1.4) sind ebenso wie die Nullstellen reell. Grundlage ist die Padé-Funktion $p(\lambda)$ (1.6).

3 a1) Die herkömmliche Regula falsi.

Für irgend zwei Testpunkte λ_1 und λ_2 besteht ein Vorzeichenwechsel, gekennzeichnet durch

$$\lambda_1 < \lambda_2; \quad p(\lambda_1) > 0, \quad p(\lambda_2) < 0. \quad (3.1)$$

Dann liegt zwischen λ_1 und λ_2 eine Nullstelle der Funktion $p(\lambda)$ und damit auch eine (womöglich mehrfache) Nullstelle von $f(\lambda)$.

Die Regula falsi mit dem Differenzenquotienten

$$\Delta_2 = \frac{p(\lambda_2) - p(\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.2)$$

liefert eine erste (im allgemeinen recht grobe) Näherung

$$\lambda_3 = \lambda_1 - \frac{p(\lambda_1)}{\Delta_2}. \quad (3.3)$$

3 a2) Die beschleunigte Regula falsi

Die Näherung λ_3 lässt sich verbessern durch Hinzunahme eines weiteren Differenzenquotienten

$$\Delta_3 = \frac{p(\lambda_3) - p(\lambda_1)}{\lambda_3 - \lambda_1} \quad (3.4)$$

sowie den beiden Quotienten

$$Q_2 = \frac{p(\lambda_2)}{p(\lambda_1)}; \quad Q_3 = \frac{p(\lambda_3)}{p(\lambda_1)}. \quad (3.5)$$

Damit wird

$$\lambda_4 = \lambda_1 = \frac{p(\lambda_2) - p(\lambda_3)}{Q_2\Delta_3 - Q_3\Delta_2} \quad (3.6)$$

und dies lässt sich iterativ fortsetzen auf folgende Weise.

Erster Schritt.

Ersetze in (3.2) bis (3.6) die Indizes 1,2 und 3 durch 2,3 und 4, und berechne damit das Wertepaar λ_5 ; $p(\lambda_5)$.

Zweiter Schritt.

Ersetze in (3.2) bis (3.6) die Indizes 1,2 und 3 durch 3,4 und 5, und berechne damit das Wertepaar λ_6 ; $p(\lambda_6)$.

Diese damit erklärte Iteration wird abgebrochen, wenn a)

$$|p(\lambda_\mu)| \leq 10^{-\sigma} \quad (3.7)$$

geworden ist oder

b) unter Verzicht auf ein Abbruchkriterium ein Index μ vorgegeben wird.

Nun zur Sondierung. Nach Wahl einer Schrittweite δ werden auf der λ -Achse von Null beginnend die Wertepaare

$$\lambda_j; p(\lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (3.8)$$

berechnet bis ein erster, zweiter, dritter usw. Vorzeichenwechsel gefunden wurde.

3 b) Um auch die negativen Nullstellen einzuschließen, wird mit der Ko-Funktion

$$\hat{p}(\lambda) = \frac{f(-\lambda)}{-f'(-\lambda)} \quad (3.9)$$

gleichzeitig die Folge (3.4) durchgeführt bis alle m Nullstellen ermittelt sind.

3 c) Sehr viel aufwendiger gestaltet sich die Sondierung innerhalb der komplexen Zahlenebene, da hier kein Vorzeichenwechsel nach Art von (3.1) zur Verfügung steht.

3 d) Diagonaldominante Polynommatrizen

Bei hinreichend ausgeprägter Diagonaldominanz sind die $m = \rho \cdot n$ Nullstellen der Gleichungen

$$f_{jj}(\lambda) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.10)$$

brauchbare Startwerte für die im Abschnitt 2 aufgeführten Algorithmen. Im Sonderfall $\rho = 2$ sind somit n quadratische Gleichungen zu lösen, siehe dazu auch das zweite Beispiel.

4. Eigenvektoren einer Polynommatrix

Es geht im Folgenden um die Gleichungen (1.1)

$$\mathbf{F}(\lambda)\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (4.1)$$

mit der Polynommatrix (1.2).

Es sei λ_k ein einfacher Eigenwert, dann besitzt die Matrix

$$\mathbf{F}(\lambda_k) \quad (4.2)$$

den Rang $n-1$.

a) Transformation nach Gauß

Spaltenpivotsuche in der Reihenfolge 1, 2, ..., m-1 und Vertauschung zweier Zeilen, sofern dies erforderlich wird. Auf diese Weise geht die Matrix (4.2) über in

$$\tilde{\mathbf{F}}(\lambda_k) = \begin{bmatrix} \tilde{\nabla}_k & \mathbf{w}_k \\ \mathbf{o}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

mit einer regulären oberen Dreiecksmatrix $\tilde{\nabla}_k$ der Ordnung n-1 und einer Spalte \mathbf{w}_k der Länge n-1.

b) Transformation nach Jordan² in der Reihenfolge

$$n-1, \quad n-2, \quad \dots \quad 2. \quad (4.4)$$

Damit geht die Matrix (4.3) über in

$$\hat{\mathbf{F}}(\lambda_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_k & \mathbf{z}_k \\ \mathbf{o}^T & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

mit einer regulären Diagonalmatrix \mathbf{D}_k der Ordnung n-1.

Der gesuchte Eigenvektor ist dann

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_k^{-1} \mathbf{z}_k \\ -1 \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

wovon man sich leicht überzeugt.

Da das Gleichungssystem (1.1) homogen ist, ist auch

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_k \cdot \alpha_k; \quad \alpha_k \neq 0 \quad (4.7)$$

ein Eigenvektor, wo der Faktor α_k geeignet zu wählen ist, etwa zum Zweck der Normierung gemäß

$$\mathbf{x}_k^* \mathbf{x}_k = 1, \quad (4.8)$$

doch wird man im allgemeinen

$$\alpha_k = 1 \quad (4.9)$$

setzen.

² Wilhelm Jordan, Geometer 1842–1899

Mehrfache Eigenwerte

Es sei λ_k eine Nullstelle der Vielfachheit v_k und r_k der Rangabfall der Matrix $\mathbf{F}(\lambda_k)$, wo bekanntlich

$$r_k \leq v_k \quad (4.10)$$

gilt.

Die Matrix (4.3) ist jetzt allgemeiner als dort

$$\tilde{\mathbf{F}}(\lambda_k) = \begin{bmatrix} \tilde{\nabla} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

wo die Nullmatrix unten rechts die Ordnung r_k besitzt.

Es folgt analog zu (4.3) bis (4.6)

$$\hat{\mathbf{F}}(\lambda_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_k & \tilde{\mathbf{Z}}_k \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

und daraus

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_k^{-1} \tilde{\mathbf{Z}}_k \\ -\mathbf{I}_{r_k} \end{bmatrix} = (\mathbf{x}_1 \quad \mathbf{x}_2 \quad \dots \quad \mathbf{x}_{r_k}), \quad (4.13)$$

und dies sind r_k linear unabhängige Eigenvektoren zum Eigenwert λ_k , wo jeder von ihnen nach (4.7) bis (4.9) normiert werden kann.

Falls $r_k < v_k$ ist, können bei Bedarf die r_k Eigenvektoren (4.13) durch Hauptvektoren ergänzt werden, siehe dazu [10, Seite 253].

Nun zu den Linkseigenvektoren. Aus der Gleichung

$$\mathbf{y}^T \mathbf{F}(\lambda) = \mathbf{0} \quad (4.14)$$

folgt durch Transposition

$$[\mathbf{y}^T \mathbf{F}(\lambda)]^T = [\mathbf{0}^T]^T \rightarrow \mathbf{F}^T(\lambda) \mathbf{y} = \mathbf{0}, \quad (4.15)$$

und damit kann alles vorige sinngemäß übernommen werden.

5. Die ECP-Transformation

Dieser in [10, S. 411] beschriebene Algorithmus basiert auf der Bereitstellung von m paarweise verschiedenen (disjunkten) Stützwerten

$$\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m, \quad (5.1)$$

die geeignet zu wählen sind. Mit diesen sind definiert die Stützpolynome

$$g_k(\lambda) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m (\sigma_j - \lambda); \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5.2)$$

und damit die Padé-Funktionen

$$P_k(\lambda) = \frac{f(\lambda)}{g_k(\lambda)} \cdot \frac{1}{a_m}; \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (5.3)$$

Für $\lambda = \sigma_k$ entsteht daraus der (in [1] und [2] auch als Knoten bezeichnete) Defekt

$$d_k = \sigma_k - d_k; \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (5.4)$$

und damit der dem Defekt zugeordnete sogenannte **Hauptwert**

$$H_k = \frac{f(\sigma_k)}{g_k(\sigma_k)} \cdot \frac{1}{a_m}; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (5.5)$$

Alle diese Werte werden zusammengestellt in einer Liste

$$L_m = \left\{ \begin{array}{ccc} \text{Stützwerte} & \text{Defekte} & \text{Hauptwerte} \\ \hline \sigma_1 & d_1 & H_1 \\ \sigma_2 & d_2 & H_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_m & d_m & H_m \end{array} \right\}, \quad (5.6)$$

welche die gesamte Information der Polynommatrix (1.2) enthält. Die Reihenfolge der einzelnen Zeilen ist dabei beliebig. Die Kontrollgleichung

$$\sum_{j=1}^m H_j = -\frac{a_{m-1}}{a_m}, \quad (5.7)$$

verbürgt die fehlerfreie Berechnung der Defekte (5.4) aus den Stützwerten (5.1).

6. Der ECP-Rayleigh-Quotient

Nach [3, Seite 42] gilt die Eigenwertgleichung

$$\det \mathbf{F}(\lambda) = \det(\mathbf{E} - \lambda \mathbf{I}_m) = 0 \quad (6.1)$$

mit der ECP-Begleitmatrix

$$\mathbf{E} = \mathbf{Diag} \langle \sigma_j \rangle - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} (d_1 \quad d_2 \dots d_m). \quad (6.2)$$

Der mit dem Vektorpaar

$$\mathbf{y}^T(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1 - \lambda} & \frac{1}{\sigma_2 - \lambda} & \dots & \frac{1}{\sigma_m - \lambda} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{d_1}{\sigma_1 - \lambda} \\ \frac{d_2}{\sigma_2 - \lambda} \\ \vdots \\ \frac{d_m}{\sigma_m - \lambda} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

gebildete Rayleigh-Quotient

$$R(\lambda) = \frac{\mathbf{y}^T(\lambda) \mathbf{E} \mathbf{x}(\lambda)}{\mathbf{y}^T(\lambda) \mathbf{I}_m \mathbf{x}(\lambda)} \quad (6.4)$$

führt mit den Summen

$$S_1(\lambda) = \sum_{j=1}^m \frac{d_j}{\sigma_j - \lambda}, \quad (6.5)$$

$$S_2(\lambda) = \sum_{j=1}^m \frac{d_j}{(\sigma_j - \lambda)^2}, \quad (6.6)$$

$$S_\sigma(\lambda) = \sum_{j=1}^m \frac{d_j \sigma_j}{(\sigma_j - \lambda)^2} \quad (6.7)$$

nach einer elementaren Rechnung auf

$$R(\lambda) = \frac{S_\sigma(\lambda) - S_1^2(\lambda)}{S_2(\lambda)}, \quad (6.8)$$

und damit ist definiert der Algorithmus

$$\Lambda_{j+1} = \Lambda_j + R(\Lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (6.9)$$

Der Start erfolgt mit einem Hauptwert H_k .

7. Die verkürzte Eigenwertgleichung

Neben der Eigenwertgleichung (6.1) existiert nach [3, Seite 46] die verkürzte Eigenwertgleichung

$$\tilde{f}(\lambda) = S_1(\lambda) - 1 = 0. \quad (7.1)$$

Mit der Ableitung

$$\tilde{f}'(\lambda) = S_1'(\lambda) - 0 = S_2(\lambda) \quad (7.2)$$

lautet somit die Padé-Funktion

$$p_E(\lambda) = \frac{\tilde{f}(\lambda)}{-\tilde{f}'(\lambda)} = \frac{S_1(\lambda) - 1}{-S_2(\lambda)} \quad (7.3)$$

und damit der nach dem Muster von (2.1) abgeleitete Algorithmus

$$\Lambda_{j+1} = \Lambda_j + p_E(\Lambda_j); \quad j = 1, 2, \dots \quad (7.4)$$

Der Start erfolgt mit einem Hauptwert H_k .

8. Die Evolution

8 a) Dieser in [3, Seite 44] eingeführte Algorithmus ist in wenigen Worten beschrieben. Ersetze in der Liste (4.8) die Stützwerte durch die Hauptwerte und fertige mit diesen eine neue Liste an. Dieses Vorgehen wird so oft wiederholt, bis einige oder alle Defekte einen vorgegebenen Schwellwert unterschritten haben. Die Hauptwerte der letzten Liste dienen dann als Startwert für den Algorithmus im Abschnitt 2.

9. Numerische Durchführbarkeit. Ergänzungen

9 a) Ermittlung der Vielfachheit für den Algorithmus (2.9).

Man lässt den Algorithmus für $v = 1, v = 2$ usw. parallel laufen. Konvergenz erfolgt genau einmal. Damit sind Nullstelle und Vielfachheit ermittelt.

Der Taylor-Test mit dem charakteristische Polynom (1.4)

$$\left. \begin{array}{l} v = 1 : \quad \left. \begin{array}{l} f(a) = 0 \\ f'(a) \neq 0 \end{array} \right\} \\ v = 2 : \quad \left. \begin{array}{l} f(a) = 0 \\ f'(a) = 0 \\ f''(a) \neq 0 \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (9.1)$$

und analog für $v > 2$ kann als Kontrolle dienen.

9 b) Die Matrix (6.2) lautet ausmultipliziert

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} H_1 & -d_2 & -d_3 & \dots & -d_{m-1} & -d_m \\ -d_1 & H_2 & -d_3 & \dots & -d_{m-1} & -d_m \\ -d_1 & -d_2 & H_3 & \dots & -d_{m-1} & -d_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -d_1 & -d_2 & -d_3 & \dots & H_{m-1} & -d_m \\ -d_1 & -d_2 & -d_3 & \dots & -d_{m-1} & H_m \end{bmatrix}, \quad (9.2)$$

und damit wird

$$\text{Spur } \mathbf{E} = \sum_{j=1}^m H_j = \sum_{j=1}^m \lambda_j = -\frac{a_{m-1}}{a_m}, \quad (9.3)$$

womit die Gleichung (5.7) bewiesen ist.

9 c) Einschließungssätze nach Gerschgorin mittels der Matrix

$$\mathbf{F}(\lambda) = \mathbf{E} - \lambda \mathbf{I}_n. \quad (9.4)$$

Es liegt vor ein Kreis mit dem Mittelpunkt

$$H_k = U_k + V_k \cdot i \quad (9.5)$$

und dem Radius

$$r_k = (n-1) \cdot |d_k|. \quad (9.6)$$

Wenn dieser Kreis von den übrigen $n-1$ Kreisen getrennt liegt, so sind zwei Fälle zu unterscheiden.

9 c1) Der Hauptwert H_k ist reell. Dann ist auch der eingeschlossene Eigenwert λ_k reell, und es gilt

$$-r_k + H_k < \lambda_k < H_k + r_k \quad (9.7)$$

9 c2) Für den komplexen Eigenwert

$$\lambda_k = u_k + v_k \cdot i \quad (9.8)$$

dagegen gelten die Einschließungen

$$-r_k + U_k < u_k < U_k + r_k, \quad (9.9)$$

und

$$-r_k + V_k < v_k < V_k + r_k. \quad (9.10)$$

Bei mehrfachen Eigenwerten oder Eigenwerthaufen existieren simultane Einschließungen, siehe dazu [3. Seite 52].

9 d) Ordnungserniedrigung

9 d1) Skalares Polynom. Abspalten einer Nullstelle mittels HORNER-Schema.

9 d2) Matrizenpolynom (1.2). Abspalten von jeweils n Eigenwerten en bloc nach [5].

10. Numerische Beispiele

Erstes Beispiel

Sondierung nach Abschnitt 3 mittels Padé-Funktion $p(\lambda)$ (1.6).

Vorgegeben ist das Polynom

$$f(\lambda) = 4 + 12\lambda + 9\lambda^2 - 4\lambda^3 - 6\lambda^4 + 0 \cdot \lambda^5 + \lambda^6 \quad (10.1)$$

mit den Nullstellen

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2; \quad \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = -1. \quad (10.2)$$

Sondierung mit $\delta = 0,3$ führt auf die Wertepaare

Λ	$p(\Lambda)$	
3.0000000000000000e-01	-5.261904761904761e-01	}
6.0000000000000000e-01	-9.333333333333332e-01	
9.0000000000000000e-01	-3.483333333333336e+00	
1.2000000000000000e+00	1.466666666666667e+00	
1.5000000000000000e+00	4.166666666666667e-01	
$\lambda_1 = 1.8000000000000000e+00$	1.166666666666663e-01	}
$\lambda_2 = 2.1000000000000000e+00$	-4.696969696969665e-02	

(10.3)

Vorzeichenwechsel

Es folgt die Regula falsi (3.5) gerundet auf

$$\lambda_3 = 2.01389 \quad (10.4)$$

und damit nach (2.9)

$$\left. \begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_1(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 2.013890000000000e+00 & -3.428770022238466e-03 \\ 2 & 2.006984834339914e+00 & -1.735089829011837e-03 \\ 3 & 2.003502535366870e+00 & -8.728302942998172e-04 \\ 4 & 2.001753817659295e+00 & -4.377505086146021e-04 \\ 5 & 2.000877548907494e+00 & -2.192108705613412e-04 \end{array} \right\} \quad (10.5)$$

Keine Konvergenz für $v = 1$.

$$\left. \begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_2(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 2.013890000000000e+00 & -6.734450893113345e-03 \\ 2 & 2.000327556690868e+00 & -1.636577281729843e-04 \\ 3 & 2.000000187627338e+00 & -9.381362945114195e-08 \\ 4 & 2.000000000000006e+00 & -3.090806074727201e-14 \\ 5 & 2.000000000000000e+00 & 0 \end{array} \right\} \quad (10.6)$$

Konvergenz für $v = 2$, somit ist

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 2. \quad (10.7)$$

Der Ersatz von λ durch $-\lambda$ führt auf das Kopolynom

$$f(-\lambda) = 4 - 12\lambda + 9\lambda^2 + 4\lambda^3 - 6\lambda^4 - 0 \cdot \lambda^5 + \lambda^6. \quad (10.8)$$

Sondierung

$$\left. \begin{array}{cc} \Lambda & p(\Lambda) \\ \hline 3.000000000000000e-01 & -2.064102564102564e-01 \\ 6.000000000000000e-01 & -1.083333333333336e-01 \\ 9.000000000000000e-01 & -2.543859649125041e-02 \\ 1.200000000000000e+00 & 4.848484848484354e-02 \\ 1.500000000000000e+00 & 1.166666666666667e-01 \end{array} \right\} \quad (10.9)$$

Es folgt die Regula falsi (3.5) gerundet auf

$$\lambda_3 = 1.00324 \quad (10.10)$$

und damit der Algorithmus (2.9).

Für $v = 1$, $v = 2$, $v = 3$ tritt keine Konvergenz ein.

Dagegen wird für $v = 4$

$$\left. \begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_4(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 1.0032400000000000e+00 & -3.191729984318953e-03 \\ 2 & 1.000037928810532e+00 & -3.792209825976858e-05 \\ 3 & 1.000000005273932e+00 & -5.273931558410046e-09 \\ 4 & 1.0000000000000000e+00 & -2.343804163097548e-16 \end{array} \right\} \quad (10.11)$$

Somit vier Mal + 1 im Kopolynom. Folglich

$$\lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = -1 \quad (10.12)$$

MATLAB liefert die Nullstellen

$$\left. \begin{array}{lcl} \tilde{\lambda}_1 & = & 2.0000000000000001e+00 + 7.152216756864169e-09i \\ \tilde{\lambda}_2 & = & 2.0000000000000001e+00 - 7.152216756864169e-09i \\ \tilde{\lambda}_3 & = & -1.000143391292847e+00 \\ \tilde{\lambda}_4 & = & -9.999999991419022e-01 + 1.433904397109860e-04i \\ \tilde{\lambda}_5 & = & -9.999999991419022e-01 - 1.433904397109860e-04i \\ \tilde{\lambda}_6 & = & -9.998566104233441e-01 \end{array} \right\} \quad (10.13)$$

Zweites Beispiel

Diagonaldominante Matrix nach Abschnitt (3.7).

$$\mathbf{F}(\lambda) = \begin{bmatrix} 5+2\lambda+3\lambda^2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 9+3\lambda+\lambda^2 & -3 & -2 & 0 \\ 0 & -3 & 6+\lambda^2 & -2 & 0 \\ 0 & -2 & 2 & 12+\lambda+\lambda^2 & -5-\lambda \\ 0 & 0 & 0 & -5-\lambda & 8+4\lambda+4\lambda^2 \end{bmatrix}. \quad (10.14)$$

mit

$$\det \mathbf{F}(\lambda) = f(\lambda) = 12221 + 19366\lambda + 33492\lambda^2 + 28079\lambda^3 + 23637\lambda^4 + 11574\lambda^5 + 5699\lambda^6 + 1631\lambda^7 + 489\lambda^8 + 68\lambda^9 + 12\lambda^{10}. \quad (10.15)$$

Die quadratischen Gleichungen (6.4)

$$\left. \begin{array}{lcl} 5+2\lambda+3\lambda^2 & = & 0 \\ 9+3\lambda+\lambda^2 & = & 0 \\ 6+\lambda^2 & = & 0 \\ 12+\lambda+\lambda^2 & = & 0 \\ 8+4\lambda+4\lambda^2 & = & 0 \end{array} \right\} \quad (10.16)$$

besitzen die Nullstellen

$$\left. \begin{array}{l} -3.33333333333334e-01 + 1.247219128924647e+00i \\ -3.33333333333334e-01 - 1.247219128924647e+00i \\ -1.50000000000000e+00 + 2.598076211353316e+00i \\ -1.50000000000000e+00 - 2.598076211353316e+00i \\ 0 + 2.449489742783178e+00i \\ 0 - 2.449489742783178e+00i \\ -4.99999999999998e-01 + 3.427827300200522e+00i \\ -4.99999999999998e-01 - 3.427827300200522e+00i \\ -5.00000000000000e-01 + 1.32287565532295e+00i \\ -5.00000000000000e-01 - 1.32287565532295e+00i \end{array} \right\} \quad (10.17)$$

Wir wählen die dritte Zeile aus (10.17) als Startwert und erhalten die folgenden Ergebnisse.

a) Algorithmus (2.1).

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p(\Lambda_j) \\ \hline 1 & -1.50000000000000e+00+2.598076211353316e+00i & 2.032105570683291e-01-7.395719545396148e-02i \\ 2 & -1.296789442931671e+00+2.524119015899355e+00i & 1.773110756693907e-01-2.275434281511629e-02i \\ 3 & -1.119478367262280e+00+2.501364673084238e+00i & 1.320427191450034e-01+5.627450679466858e-02i \\ 4 & -9.874356481172767e-01+2.557639179878907e+00i & -3.007105982831948e-02+8.920521695652191e-02i \\ 5 & -1.017506707945596e+00+2.646844396835429e+00i & 7.359853863202630e-04-2.137437648438716e-02i \\ 6 & -1.016770722559276e+00+2.625470020351042e+00i & -9.748769601593532e-04-1.081681076639398e-03i \\ 7 & -1.017745599519435e+00+2.624388339274403e+00i & -5.137187053597404e-06+4.029601688399558e-06i \\ 8 & -1.017750736706489e+00+2.624392368876091e+00i & 1.136121179599617e-10-6.578228494562704e-11i \\ 9 & -1.017750736592877e+00+2.624392368810308e+00i & 2.009798662754188e-15-1.502768992132371e-15i \end{array} \quad (10.18)$$

b) Algorithmus (2.9).

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_1(\Lambda_j) \\ \hline 1 & -1.50000000000000e+00+2.598076211353316e+00i & -5.590550503850626e-02-5.178554874365029e-02i \\ 2 & -1.281598940159485e+00+2.530507771744555e+00i & -3.206896765146202e-02-5.435962387848091e-02i \\ 3 & -1.102941934511756e+00+2.519024236220835e+00i & 4.957773050493467e-03-4.558545263614854e-02i \\ 4 & -9.935792103013821e-01+2.581791094008818e+00i & 2.032174795110959e-02+2.087166993263317e-03i \\ 5 & -1.019159105737506e+00+2.632183836150752e+00i & -2.713265716958361e-03+4.879297147422435e-04i \\ 6 & -1.017678176984104e+00+2.624544743975652e+00i & -4.116398540465768e-05+4.357842452009323e-05i \\ 7 & -1.017750658819505e+00+2.624392358442496e+00i & 1.342417115296137e-08+2.442886475494064e-08i \\ 8 & -1.017750736592890e+00+2.624392368810295e+00i & 2.991635783682046e-15-6.560209464970359e-15i \end{array} \quad (10.19)$$

Beide Algorithmen konvergieren quadratisch und liefern nahezu identische Werte. Auf die gleiche Weise werden parallel und unabhängig voneinander die übrigen neun Nullstellen berechnet.

Drittes Beispiel

Evolution nach Abschnitt 8.

Das nach Wilkinson benannte Polynom

$$f(\lambda) = (1 - \lambda)(2 - \lambda) \dots (9 - \lambda)(10 - \lambda) \quad (10.20)$$

oder ausmultipliziert

$$f(\lambda) = 3628800 - 10628640\lambda + 12753576\lambda^2 - 8409500\lambda^3 + 3416930\lambda^4 - 902055\lambda^5 + 157773\lambda^6 - 18150\lambda^7 + 1320\lambda^8 - 55\lambda^9 + \lambda^{10} \quad (10.21)$$

besitzt die Nullstellen 1, 2, . . . , 10.

MATLAB liefert die Näherungen.

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda}_1 &= 1.000000000032865e+01 \\ \tilde{\lambda}_2 &= 8.999999998364443e+00 \\ \tilde{\lambda}_3 &= 8.000000003420013e+00 \\ \tilde{\lambda}_4 &= 6.999999996085851e+00 \\ \tilde{\lambda}_5 &= 6.000000002669752e+00 \\ \tilde{\lambda}_6 &= 4.999999998898655e+00 \\ \tilde{\lambda}_7 &= 4.000000000263102e+00 \\ \tilde{\lambda}_8 &= 2.99999999968169e+00 \\ \tilde{\lambda}_9 &= 2.00000000001345e+00 \\ \tilde{\lambda}_{10} &= 1.000000000000000e+00 \end{aligned} \right\} \quad (10.22)$$

Diese benutzen wir als Stützwerte (5.1) und bekommen damit die Liste

$$L_{10} = \left(\begin{array}{ccc} \text{Stützwerte} & \text{Defekte} & \text{Hauptwerte} \\ 1.000000000032865e+01 & 3.727125322099494e-10 & 9.99999999955941e+00 \\ 8.999999998364443e+00 & -1.72009413361112e-09 & 9.000000000084537e+00 \\ 8.000000003420013e+00 & 3.167697847832428e-09 & 8.000000000252316e+00 \\ 6.999999996085851e+00 & -4.044785689387324e-09 & 7.000000000130637e+00 \\ 6.000000002669752e+00 & 2.348194056725277e-09 & 6.000000000321559e+00 \\ 4.999999998898655e+00 & -1.197945997413012e-09 & 5.000000000096601e+00 \\ 4.000000000263102e+00 & 2.777798930869391e-10 & 3.99999999985322e+00 \\ 2.99999999968169e+00 & -3.340011018696152e-11 & 3.000000000001569e+00 \\ 2.00000000001345e+00 & 1.21265960237197e-12 & 2.000000000000132e+00 \\ 1.000000000000000e+00 & 0.000000000000000e+00 & 1.000000000000000e+00 \end{array} \right) \quad (10.23)$$

Es folgen die beiden Evolutionen

$$L_{10} = \left(\begin{array}{ccc} \text{Stützwerte} & \text{Defekte} & \text{Hauptwerte} \\ 9.99999999955941e+00 & -5.567454977060759e-11 & 1.000000000001162e+01 \\ 9.000000000084537e+00 & -3.564064318273009e-11 & 9.000000000120178e+00 \\ 8.000000000252316e+00 & -8.075158037691484e-11 & 8.000000000333067e+00 \\ 7.000000000130637e+00 & 2.082540757136542e-10 & 6.99999999922383e+00 \\ 6.000000000321559e+00 & 2.186021042651543e-10 & 6.000000000102957e+00 \\ 5.000000000096601e+00 & 6.758556180612028e-11 & 5.00000000029015e+00 \\ 3.99999999985322e+00 & -1.347399557668777e-11 & 3.99999999998797e+00 \\ 3.000000000001569e+00 & 4.296279733101633e-12 & 2.99999999997273e+00 \\ 2.000000000000132e+00 & 6.929483440822838e-14 & 2.000000000000063e+00 \\ 1.000000000000000e+00 & 0.000000000000000e+00 & 1.000000000000000e+00 \end{array} \right) \quad (10.24)$$

$$L_{10} = \left(\begin{array}{ccc} \text{Stützwerte} & \text{Defekte} & \text{Hauptwerte} \\ 1.000000000001162e+01 & 1.774461056701600e-11 & 9.99999999993872e+00 \\ 9.000000000120178e+00 & -7.047284661419908e-11 & 9.000000000190651e+00 \\ 8.000000000333067e+00 & -7.797978696197630e-11 & 8.000000000411047e+00 \\ 6.99999999922383e+00 & -3.380356010780448e-10 & 7.000000000260418e+00 \\ 6.000000000102957e+00 & 1.409918897505596e-10 & 5.99999999961965e+00 \\ 5.00000000029015e+00 & 7.793359042933322e-11 & 4.99999999951082e+00 \\ 3.99999999998797e+00 & -5.928558055009481e-12 & 4.00000000004725e+00 \\ 2.99999999997273e+00 & -2.910383045325759e-12 & 3.000000000000184e+00 \\ 2.000000000000063e+00 & 4.619655627634508e-14 & 2.000000000000016e+00 \\ 1.000000000000000e+00 & 0.000000000000000e+00 & 1.000000000000000e+00 \end{array} \right) \quad (10.25)$$

Summenkontrolle (3.7)

$$\text{Soll : } \sum_{j=1}^{10} H_j = -\frac{-55}{a} = 55. \quad \text{Ist: } 49,466 \quad (10.26)$$

Viertes Beispiel

Korrektur von mehrfachen Eigenwerten nach (2.9).

Vorgegeben ist die Matrix

$$\mathbf{F}(\lambda) = \mathbf{A} - \lambda \mathbf{B} \quad (10.27)$$

mit

$$\mathbf{A} = \left[\begin{array}{cccc|c} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{array} \right]; \quad \mathbf{B} = \mathbf{I}_5. \quad (10.28)$$

Ihre Eigenwerte sind

$$\lambda_1 = -2; \quad \lambda_2 = \lambda_3 = -1; \quad \lambda_4 = \lambda_5 = 1. \quad (10.29)$$

MATLAB liefert die Näherungen

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_1 &= -1.999999999999996e+00 \\ \tilde{\lambda}_2 &= 1.000000000000000e+00 + 7.768125062636118e-09i \\ \tilde{\lambda}_3 &= 1.000000000000000e+00 - 7.768125062636118e-09i \\ \tilde{\lambda}_4 &= -1.000000009896685e+00 \\ \tilde{\lambda}_5 &= -9.999999901033162e-01 \end{aligned} \quad (10.30)$$

Es folgen die Korrekturen nach (2.9).

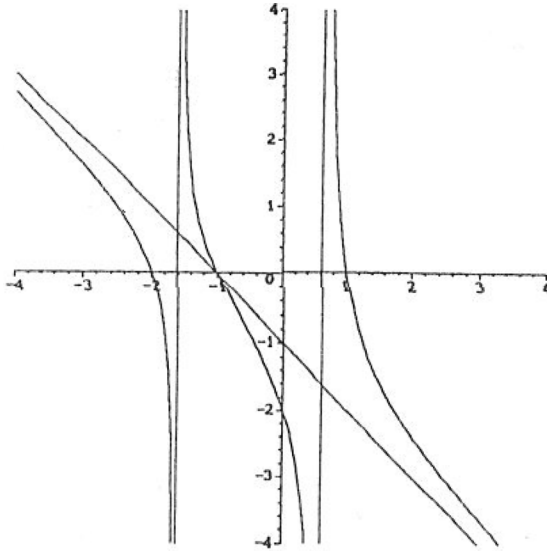


Bild 2: Die Padé-Funktion zur Matrix (10.28)

Start mit $\tilde{\lambda}_5$.

j	Λ_j	$p_1(\Lambda)$	
1	-9.999999901033162e-01	-1.121813169708485e-08	(10.31)
2	-1.000000001321448e+00	0	

Keine Konvergenz für $v = 1$.

j	Λ_j	$p_2(\Lambda)$	
1	-9.999999901033162e-01	-9.896683722532278e-09	(10.32)
2	-9.999999999999999e-01	-1.665334536937735e-16	

Konvergenz für $v = 2$.

Somit $\lambda_4 = \lambda_5 = 1$.

Start mit $\tilde{\lambda}_1$.

j	Λ_j	$p_1(\Lambda)$	
1	-1.999999999999999e+00	-3.552713678800562e-15	(10.33)
2	-2.000000000000000e+00	0	

Somit $\lambda_1 = -2$.

Start mit $\tilde{\lambda}_2$.

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_1(\Lambda) \\ \hline 1 & 1.000000000000000e+00+7.768125062636118e-09i & -1.491714852512857e-16-4.764011116681661e-09i \\ 2 & 1.000000000000000e+00+3.004113945954457e-09i & -2.065119601239563e-16-1.334040524532894e-23i \end{array} \quad (10.34)$$

Keine Konvergenz für $v = 1$.

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_2(\Lambda) \\ \hline 1 & 1.000000000000000e+00+7.768125062636118e-09i & -5.744419753425677e-16-7.768125062636107e-09i \\ 2 & 9.999999999999999e-01+1.158052857574239e-23i & 1.295260195396017e-16-1.158052857574239e-23i \end{array} \quad (10.35)$$

Konvergenz für $v = 2$.

Somit $\lambda_2 = \lambda_3 = -1$.

Fünftes Beispiel

Mehrfache komplexe Nullstellen.

Das Polynom

$$f(\lambda) = (1 + \lambda + \lambda^2)^3 \cdot (1 + \lambda^2)^2 \cdot 6 \quad (10.36)$$

ergibt ausmultipliziert

$$f(\lambda) = 6 + 18\lambda + 48\lambda^2 + 78\lambda^3 + 114\lambda^4 + 120\lambda^5 + 114\lambda^6 + 78\lambda^7 + 48\lambda^8 + 18\lambda^9 + 6\lambda^{10}. \quad (10.37)$$

Die Nullstellen sind

$$\left. \begin{array}{lcl} \lambda_1 & = & 0 + i \\ \lambda_2 & = & 0 - i \\ \lambda_3 & = & 0 + i \\ \lambda_4 & = & 0 - i \\ \lambda_5 & = & -0.5 + \sqrt{0.75}i \\ \lambda_6 & = & -0.5 - \sqrt{0.75}i \\ \lambda_7 & = & -0.5 + \sqrt{0.75}i \\ \lambda_8 & = & -0.5 - \sqrt{0.75}i \\ \lambda_9 & = & -0.5 + \sqrt{0.75}i \\ \lambda_{10} & = & -0.5 - \sqrt{0.75}i \end{array} \right\} \quad (10.38)$$

mit

$$\sqrt{0.75} = 8.660254037844386e - 01. \quad (10.39)$$

MATLAB liefert die Näherungen

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\lambda}_1 &= 2.103940549558203e-08 + 1.0000000028920264e+00i \\ \tilde{\lambda}_2 &= 2.103940549558203e-08 - 1.0000000028920264e+00i \\ \tilde{\lambda}_3 &= -2.103939766850971e-08 + 9.999999710797240e-01i \\ \tilde{\lambda}_4 &= -2.103939766850971e-08 - 9.999999710797240e-01i \\ \tilde{\lambda}_5 &= -5.000094136551562e-01 + 8.660276783463672e-01i \\ \tilde{\lambda}_6 &= -5.000094136551562e-01 - 8.660276783463672e-01i \\ \tilde{\lambda}_7 &= -4.999933232335635e-01 + 8.660324192348879e-01i \\ \tilde{\lambda}_8 &= -4.999933232335635e-01 - 8.660324192348879e-01i \\ \tilde{\lambda}_9 &= -4.999972631112927e-01 + 8.660161137720683e-01i \\ \tilde{\lambda}_{10} &= -4.999972631112927e-01 - 8.660161137720683e-01i \end{aligned} \right\} \quad (10.40)$$

Korrektur von $\tilde{\lambda}_5$ nach (2.9).

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_1(\Lambda_j) \\ \hline 1 & -5.000094136551562e-01+8.660276783463672e-01i & 2.590606103860521e-06+4.667337884496285e-07i \\ 2 & -5.000068230490523e-01+8.660272116125788e-01i & 5.061285460948595e-06-9.728311147477021e-07i \\ 3 & -5.000017617635913e-01+8.660262387814640e-01i & -3.494617894702583e-05+1.077378144656732e-05i \\ 4 & -5.000367079425384e-01+8.660370125629105e-01i & 1.215888288037037e-05-3.935532380990325e-06i \\ 5 & -5.000245490596580e-01+8.660330770305296e-01i & 8.159422114632196e-06-2.552780638469371e-06i \end{array} \quad (10.41)$$

Keine Konvergenz für $v = 1$.

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_2(\Lambda_j) \\ \hline 1 & -5.000094136551562e-01+8.660276783463672e-01i & 4.706686932467359e-06-1.137278373809355e-06i \\ 2 & -5.000047069682237e-01+8.660265410679934e-01i & 2.353445844274929e-06-5.686590462229913e-07i \\ 3 & -5.000023535223794e-01+8.660259724089472e-01i & 1.176760802740233e-06-2.842232846214180e-07i \\ 4 & -5.000011767615767e-01+8.660256881856626e-01i & 5.883348476664755e-07-1.420315348699738e-07i \\ 5 & -5.000005884267291e-01+8.660255461541277e-01i & 2.940921445040524e-07-7.102102632529488e-08i \end{array} \quad (10.42)$$

Keine Konvergenz für $v = 2$.

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_3(\Lambda_j) \\ \hline 2 & -5.000000008552082e-01+8.660254038125426e-01i & 8.552084998311037e-10-2.810326544530710e-11i \\ 3 & -4.99999999999997e-01+8.660254037844393e-01i & -1.553244317250170e-15-2.433903049193858e-15i \end{array} \quad (10.43)$$

Konvergenz für $v = 3$, somit dreifache Nullstelle λ_5 aus (10.38) Das Polynom (10.37) ist (unbeabsichtigt) hermitesch, aber von gerader Ordnung $m = 10$, somit ist -1 keine Nullstelle. Man vergleiche dazu das zehnte Beispiel.

Sechstes Beispiel

Verkürzte Eigenwertgleichung nach (7.3) mit

$$p_E(\lambda) = \frac{S_1(\lambda) - 1}{-S_2(\lambda)} \quad (10.44)$$

Wilkinson-Polynom (10.20)

$$\left(\begin{array}{ccc} \text{Stützwerke} & \text{Defekte} & \text{Hauptwerte} \\ 1.000100000000000e+00 & 9.988178397837826e-05 & 1.000000118216022e+00 \\ 2.000200000000000e+00 & 1.997514392797159e-04 & 2.000000248560720e+00 \\ 3.000300000000000e+00 & 2.996318462367703e-04 & 3.000000368153763e+00 \\ 4.000400000000000e+00 & 3.995415371807089e-04 & 4.000000458462819e+00 \\ 5.000500000000000e+00 & 4.995001173401799e-04 & 5.000000499882660e+00 \\ 6.000599999999999e+00 & 5.995318981743213e-04 & 6.000000468101825e+00 \\ 7.000699999999999e+00 & 6.996716090711247e-04 & 7.000000328390928e+00 \\ 8.000800000000000e+00 & 7.999787558876377e-04 & 8.000000021244112e+00 \\ 9.000900000000000e+00 & 9.005807841077982e-04 & 8.999999419215891e+00 \\ 1.000100000000000e+01 & 1.001930111657591e-03 & 9.999998069888342e+00 \end{array} \right) \quad (10.45)$$

Start mit dem Hauptwert H3

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p_E(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 3.000000368155010e+00 & -3.677030854107595e-07 \\ 2 & 3.000000000451924e+00 & -4.517926727218366e-10 \\ 3 & 3.000000000000131e+00 & -5.277591961897212e-16 \end{array} \quad (10.46)$$

Zum Vergleich der Algorithmus (2.1)

$$\begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 3.000000368155010e+00 & -3.681554823412160e-07 \\ 2 & 2.999999999999527e+00 & 2.448417482860382e-12 \\ 3 & 3.000000000001975e+00 & -8.777345693336323e-13 \end{array} \quad (10.47)$$

Siebttes Beispiel

Singuläre Leitmatrix nach (4.10).

Vorgegeben ist die Polynommatrix

$$\mathbf{F}(\lambda) = \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1\lambda + \mathbf{A}_2\lambda^2 + \mathbf{A}_3\lambda^3 + \mathbf{A}_3\lambda^3 + \mathbf{A}_4\lambda^4 \quad (10.48)$$

mit den Koeffizientenmatrizen

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10.49)$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

wo die Leitmatrix \mathbf{A}_4 regulär ist, somit existieren weniger als $m = \rho \cdot n$ Eigenwerte. Wir unterscheiden zwei Vorgehensweisen.

a) über die Matrix

$$\mathbf{F}(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 + \lambda + 2\lambda^2 & \lambda + \lambda^2 + \lambda^4 \\ \lambda & 1 + \lambda + \lambda^2 \end{bmatrix}. \quad (10.50)$$

b) über das charakteristische Polynom

$$\det \mathbf{F}(\lambda) = f(\lambda) = 1 + 2\lambda + 3\lambda^2 + 2\lambda^3 + 2\lambda^4 - \lambda^5 \quad (10.51)$$

vom Grad 5; somit existieren nur 5 Nullstellen und damit auch nur 5 Eigenwerte.

Wir beginnen mit einer Sondierung mittels der Padé-Funktion (1.6) und wählen $\delta = 0.1$:

Λ_j	$p(\Lambda_j)$	
0.0	$-5.000000000000000e-01$	}
0.1	$-4.619268978444236e-01$	
0.2	$-4.401830663615560e-01$	
0.3	$-4.291374155685971e-01$	
0.4	$-4.263509749303621e-01$	
0.5	$-4.304347826086957e-01$	
0.6	$-4.404343891402715e-01$	
0.7	$-4.556680863013057e-01$	
0.8	$-4.756872635561161e-01$	
0.9	$-5.002673598217602e-01$	
1.0	$-5.294117647058824e-01$	
1.1	$-5.633714657980456e-01$	
1.2	$-6.026897069872278e-01$	
1.3	$-6.482868885971897e-01$	
1.4	$-7.016125923546420e-01$	
1.5	$-7.649164677804295e-01$	
1.6	$-8.417448071216616e-01$	
1.7	$-9.379005667657428e-01$	
1.8	$-1.063447440169645e+00$	
1.9	$-1.237357850755909e+00$	
2.0	$-1.500000000000000e+00$	
2.1	$-1.954889850621248e+00$	
2.2	$-2.970956408588159e+00$	
2.3	$-7.548939562102705e+00$	
2.4	$8.638597785977867e+00$	
2.5	$2.306324110671937e+00$	
2.6	$1.151192462987887e+00$	
2.7	$6.571120443038653e-01$	
2.8	$3.772698566917662e-01$	
2.9	$1.934476166846175e-01$	
$\lambda_1 = 3.0$	$6.086956521739131e-02$	}
$\lambda_2 = 3.1$	$-4.116006819473399e-02$	

(10.52)

Vorzeichenwechsel

daraus nach der Regula falsi

$$\lambda_3 = 3.059658712064095e+00, \quad (10.53)$$

und weiter nach (3.7) mit $\sigma = 5$

$$\lambda_4 = 3.056811621817845e+00. \quad (10.54)$$

Es folgt der Padé-Algorithmus (2.1)

$$\left. \begin{array}{c|cc} j & \Lambda_j & p(\Lambda_j) \\ \hline 1 & 3.056811621817845e+00 & -2.231403025508382e-06 \\ 2 & 3.056809390414819e+00 & -5.754993999073329e-12 \\ 3 & 3.056809390409065e+00 & -7.589857143243228e-17 \end{array} \right\} \quad (10.55)$$

a) MATLAB liefert mit der Matrix (10.50) die Eigenwerte

$$\left. \begin{array}{lcl} \tilde{\lambda}_1 & = & 3.056809390409061e+00 \\ \tilde{\lambda}_2 & = & -2.519863356616351e-02 + 8.564441482962060e-01i \\ \tilde{\lambda}_3 & = & -2.519863356616351e-02 - 8.564441482962060e-01i \\ \tilde{\lambda}_4 & = & -5.032060616383680e-01 + 4.386303194022314e-01i \\ \tilde{\lambda}_5 & = & -5.032060616383680e-01 - 4.386303194022314e-01i \end{array} \right\} \quad (10.56)$$

b) MATLAB liefert mit dem Polynom (10.51) die Nullstellen

$$\left. \begin{array}{lcl} \tilde{\lambda}_1 & = & 3.056809390409070e+00 \\ \tilde{\lambda}_2 & = & -2.519863356616392e-02 + 8.564441482962062e-01i \\ \tilde{\lambda}_3 & = & -2.519863356616392e-02 - 8.564441482962062e-01i \\ \tilde{\lambda}_4 & = & -5.032060616383678e-01 + 4.386303194022318e-01i \\ \tilde{\lambda}_5 & = & -5.032060616383678e-01 - 4.386303194022318e-01i \end{array} \right\} \quad (10.57)$$

Beide stimmen mit hinreichender Genauigkeit untereinander wie mit Λ_3 aus (10.55) überein.

Achtes Beispiel

Vorgegeben ist das Polynom

$$f(\lambda) = (\lambda - 1)(\lambda - 2)(\lambda - 3)(\lambda - 4)(\lambda - 5) \cdot 3 \quad (10.58)$$

oder ausmultipliziert

$$f(\lambda) = -360 + 822\lambda - 675\lambda^2 + 255\lambda^3 - 45\lambda^4 + 3\lambda^5. \quad (10.59)$$

Die Sondierung mit $\delta = 0.3$ führt auf die Wertepaare

$$\left. \begin{array}{cc} \Lambda_j & p(\Lambda_j) \\ \hline 0.0 & 4.379562043795621e-01 \\ 0.3 & 3.484061594869381e-01 \\ 0.6 & 2.408279034112688e-01 \\ \lambda_1 = 0.9 & 8.366965417990657e-02 \\ \lambda_2 = 1.2 & -3.884787018255549e-01 \end{array} \right\} \quad (10.60)$$

Vorzeichenwechsel

Daraus die Regula falsi

$$\lambda_3 = 9.531631550437540e - 01. \quad (10.61)$$

Wir testen den Algorithmus von Halley nach (2.4).

j	Λ_j	$h(\Lambda_j)$	(10.62)
1	9.000000000000000e-01	1.180808950230746e-01	
2	1.018080895023075e+00	-1.738293306349123e-02	
3	1.000697961959583e+00	-6.969460936557861e-04	
4	1.000001015865928e+00	-1.015863777488736e-06	
5	1.000000000002150e+00	-2.150576013567233e-12	
6	9.99999999999994e-01	7.894919286223337e-16	
7	1.000000000000000e+00	0	

In der Theorie heißt es nach [6] dazu: die Konvergenz des Halleyschen Algorithmus ist kubisch für einfache, quadratisch für mehrfache Nullstellen, doch ist (zumindest in diesem Beispiel) eine kubische Konvergenz nicht zu erkennen.

Zum Vergleich: die beschleunigte Regula falsi im Anschluss an (10.61) führt in fünf Schritten auf die exakte Lösung.

$$\left. \begin{array}{ll} \lambda_4 = 9.985736255069474e - 01 & ; \quad p(\lambda_4) = 1.422152519655597e - 03 \\ \lambda_5 = 9.999780098758768e - 01 & ; \quad p(\lambda_5) = 2.198911675590514e - 05 \\ \lambda_6 = 1.00000002011310e + 00 & ; \quad p(\lambda_6) = -2.011309654213950e - 09 \\ \lambda_7 = 1.000000000000000e + 00 & ; \quad p(\lambda_7) = 0 \end{array} \right\} \quad (10.63)$$

Literatur

- [1] CARSTENSEN, C. & E. STEIN (1987): Analysis und Berechnung der Falk'schen ECP-Transformation und verwandte Probleme, International Series of Numerical Mathematics, vol. **83**, pp. 47–61.
- [2] CARSTENSEN, C. & E. STEIN (1989): Über die Falksche ECP-Transformation und Verallgemeinerungen. Z. Angew. Math. Mech. **69**, 11, 375–391.
- [3] FALK, S. (2004): Der Eigenwertalgorithmus ECP für Polynommatrizen. Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 54.
- [4] FALK, S. (2011): Die beschleunigte Ritz-Iteration für Polynome und Polynommatrizen, Abhandlungen der Braunschweigischen wissenschaftlichen Gesellschaft Band 58.
- [5] FALK, S. (1994): Das Reduktionsverfahren für Polynommatrizen, ZAMM **74**/1, pp. 3–15.
- [6] MATHIS, W., T. THIESSEN & S. FALK: Iterationsverfahren für Nullstellenprobleme. Institut für Theoretische Elektrotechnik, Leibniz Universität Hannover.

- [7] SHAW, M. & J.F. TRAUB (1974): On the number of mulitplications for the evaluation of a polynomial and some of its derivatives. J. Assoc. Comp. Mech **21**, pp. 61–166.
- [8] STEWART, G.W. (1968): Some topics in numerical analysis, I Lehmer's method for finding the zeros of a polynomial. Technical report, Oak Ridge.
- [9] ZURMÜHL, R. & S. FALK (1992): Matrizen und ihre Anwendungen 1, Grundlagen. 6. Auflage Springer-Verlag Berlin.
- [10] ZURMÜHL, R. & S. FALK (1986): Matrizen und ihre Anwendungen 2, Numerische Methoden. 5. Auflage Springer-Verlag Berlin.

Mein Dank für die erfolgreiche Zusammenarbeit geht an die Herren M.Sc. Jonas Denißen, Berlin und an Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mathis, Leibniz Universität Hannover.

Erwin Marx und sein Beitrag zur Entwicklung der Hochspannungs-Gleichstromübertragung von 1930 bis 1945¹

DIETER KIND

Knappstraße 4, D-38116 Braunschweig

Konkrete Pläne zur Übertragung hoher elektrischer Leistungen über sehr große Entfernungen mit Gleichstrom gehen in Deutschland zurück auf die Jahre nach dem Ersten Weltkrieg. Obwohl damals schon gute Betriebserfahrungen mit 220 kV-Drehstromübertragungen über große Entfernungen vorlagen, gab es Überlegungen, die technisch-physikalischen Grenzen bei langen Freileitungen und vor allem auch bei Kabeln durch die Anwendung von Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) zu vermeiden. Einer Verwirklichung solcher Pläne aber stand damals das Fehlen von Stromrichtern für hohe Ströme und Spannungen im Wege.

Es lag also nahe, dass engagierte Ingenieure an Hochschulen und in der Industrie sich die Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern zum Ziel setzten. Zu ihnen gehörte Prof. Erwin Marx, der mit seinen Arbeiten an der Technischen Hochschule Braunschweig diese neue Technik insgesamt wesentlich förderte. Bei der schon erkannten wirtschafts- und auch wehrpolitischen Bedeutung einer sicheren Stromversorgung erfuhren solche Arbeiten insbesondere nach 1933 und erst recht nach Beginn des Zweiten Weltkriegs eine großzügige staatliche Unterstützung.

1. Erwin Marx, Hochschullehrer und innovativer Forscher

Erwin Marx, Jahrgang 1893, studierte von 1913 bis 1920, unterbrochen durch Militärdienst, Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Dresden. Als Assistent von Professor Hans Görges, wurde er 1923 promoviert. Bei einer anschließenden Industrietätigkeit als Leiter eines Hochspannungsversuchsfeldes erfand er eine geniale Vervielfachungsschaltung, die heute weltweit als „Marxscher Stoßspannungsgenerator“ bezeichnet wird².

¹ Eingegangen: 24.11.2012. Erweiterung eines Beitrags zur Buchfassung der VDE-Tagung „75 Jahre Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ“ in Berlin, 26./27. September 2011 (siehe auch elektronische Vorveröffentlichung in der Digitalen Bibliothek Braunschweig: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00050806>)

² Patentschrift vom 12.10.1923



Bild 1: Das Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig 1929.

Am 1. Oktober 1925 wurde er mit 32 Jahren als ordentlicher Professor für elektrische Messkunde und Hochspannungstechnik an die Technische Hochschule Braunschweig berufen. Für die damals noch junge Abteilung Elektrotechnik wurde ein Neubau errichtet, der 1929 nach nur zweijähriger Bauzeit eingeweiht wurde [1, S.13–62]. Sein Kernstück, das Hochspannungsinstitut (Bild 1), entstand nach den Plänen von Marx in enger Zusammenarbeit mit dem Architekten Prof. Mühlenpfordt und galt viele Jahre als Vorbild für vergleichbare Neubauten in Deutschland [2].

Heinz Göschel, der erste Doktorand von Prof. Marx und spätere Forschungschef von Siemens, schrieb seinem Lehrer 1963 zum 70. Geburtstag:

„Die Begegnung, die ich als frischgebackener Diplomingenieur mit dem jungen Ordinarius Erwin Marx hatte, brachte mir die Erkenntnis, wie der Lehrer einer hohen Schule sein sollte... Es gab jemanden, der sich für unsere tastenden Versuche, auf wissenschaftlichem Boden bestehen und vorwärts schreiten zu können, interessierte, der uns lehrte, wie eine neue Idee in der Technik nur Eingang finden kann, wenn sie physikalisch unterbaut und schriftlich ausformuliert ist“ [3].

Die Begeisterung, die Marx an seine Schüler weitergab, ist sicher einer der Gründe dafür, dass unter seiner Leitung in knapp zwei Jahrzehnten wesentliche neue Erkenntnisse auf dem weiten Gebiet der Hochspannungstechnik gewonnen wurden.

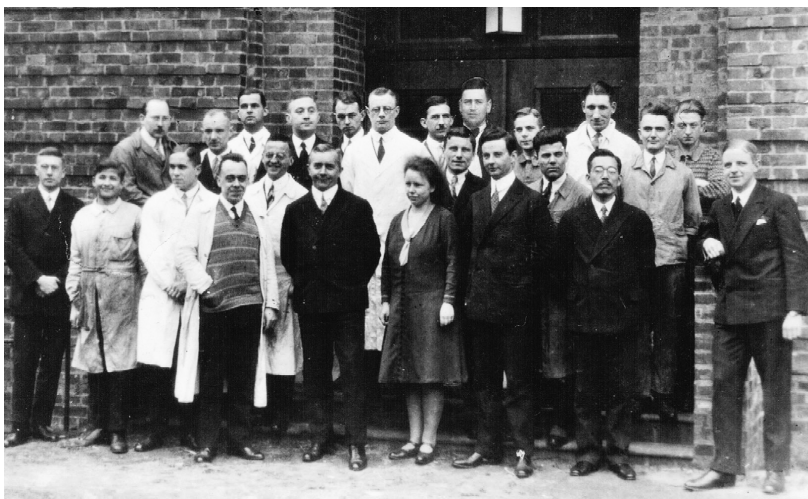


Bild 2: Prof. Marx und die Mitarbeiter des Hochspannungsinstituts 1930.

Es gelang ihm, erhebliche Drittmittel zur Durchführung von vornehmlich experimentellen Forschungsarbeiten zu beschaffen, deren Ergebnisse in zahlreichen Dissertationen wiedergegeben wurden. So erreichte das Institut schon bald eine beachtliche personelle Größe (Bild 2). Eine nach Umfang und wissenschaftlich-technischer Bedeutung besonders herausragende Arbeitsrichtung war die bis 1945 erfolgte Entwicklung des von ihm erdachten Lichtbogenstromrichters.

2. Entladungsvorgänge in Luft und Experimente mit Lichtbögen

Ausgehend von den Erfahrungen, die Marx während seiner Industrietätigkeit gemacht hatte, formulierte er 1927 in einem VDE-Vortrag seine Sicht der aktuellen Aufgaben und Ziele der Hochspannungstechnik. Er betonte dabei die Bedeutung von Untersuchungen der Durchschlagsfestigkeit von Luft für verschiedene Elektrodenanordnungen und Spannungsformen [4]. Die ersten der von ihm in den neuen Laboratorien betreuten Arbeiten widmeten sich der elektrischen Festigkeit von gasförmigen und flüssigen Dielektrika. Sie wurden von der *Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft*, der Vorgängerin der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) gefördert.

Bei der Beobachtung unsymmetrischer Anordnungen in Luft zeigte sich im Gegensatz zu homogenen Feldern bei allen Spannungsformen überraschend ein ausgeprägter Polaritätseffekt der Durchschlagsspannung, für den Marx ein phy-

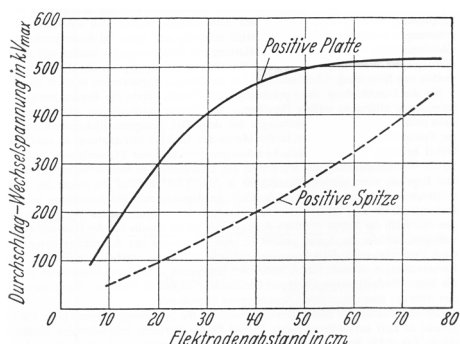


Bild 3: Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke bei 50 Hz. (nach H. Buchwald, Diss. 1930). Quelle: [5].

sikalisches Modell entwickelte. Von besonderem Interesse war die Beobachtung einer Spitze-Platte Anordnung bei Wechselspannung: Die Durchschlagsspannung bei positiver Spitze war wesentlich niedriger als bei negativer Spitze. Marx erkannte, dass dieser Effekt für eine Gleichrichtung von sehr hohen Wechselspannungen genutzt werden kann (Bild 3) [5, S.18].

Weitere neue Erkenntnisse erbrachten Untersuchungen des Durchschlagsverhaltens von Funkenstrecken bei Veränderung von Luftdruck und Elektrodentemperatur. Insbesondere auch bei strömender Luft, ergab sich bei unsymmetrischen Anordnungen ebenfalls ein deutlicher Polaritätseffekt (Bild 4) [5, S.23]. Dieses Ergebnis wurde an der in Bild 5 wiedergegebenen Anordnung gewonnen, bei der die von der Spitze ausgehende Entladung von einer intensiven Luftströmung umgeben war [5, S.84]. Diese Beobachtung dürfte den Anstoß zu der Idee gegeben haben, das Verhalten von stationären Entladungen unter dem Einfluss von Druckluftströmung im Hinblick auf eine Eignung für Lichtbogenstromrichter zu untersuchen.

3. Experimente zur Optimierung von Lichtbogenkammern

Die umfangreiche Liste von Veröffentlichungen aus dem Braunschweiger Hochspannungsinstitut zum Thema Lichtbogenstromrichter beginnt mit dem 1932 erschienenen Buch von Marx [5]. Dessen Aufbau ist insofern charakteristisch für die Arbeitsweise seines Verfassers, als es zwar das Entwicklungsziel „Lichtbogenstromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen“ im Titel herausstellt, zunächst aber ausführlich die wissenschaftlichen Grundlagen behandelt. Dabei werden nicht nur die in wenigen Jahren unter seiner Leitung von Mitarbeitern gewonnenen Arbeiten, sondern auch der Stand des Wissens über die Physik elektrischer Entladungen ausführlich beschrieben.

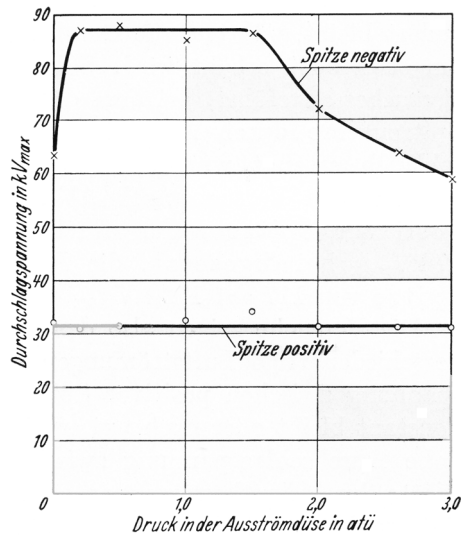


Bild 4: Durchschlagsspannung einer Spitze-Platte-Funkenstrecke mit Luftströmung nach Bild 5 bei 50 Hz (nach W. Ziegenbein, Diss. 1931). Quelle: [5].

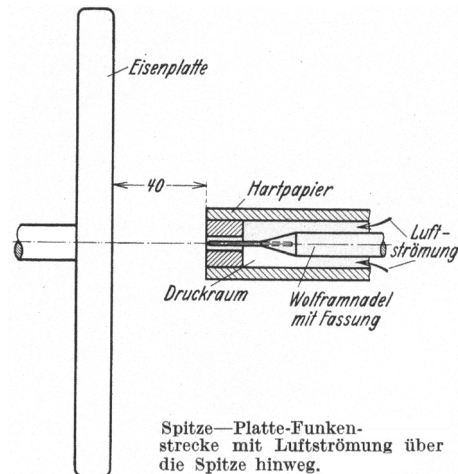


Bild 5: Spitze-Platte-Anordnung mit Luftströmung in Feldrichtung an der Spitze. Elektrodenabstand 40 mm. Quelle: [5].

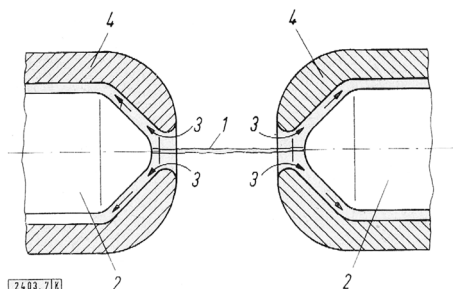


Bild 6: Haupt- und Schirmelektroden Prinzip des Lichtbogenstromrichters nach Marx. Legende im Text [2].

Bei Experimenten zur Untersuchung der elektrischen Festigkeit von Isolierungen bilden sich nach einem vollkommenen Durchschlag nur dann Lichtbogenentladungen aus, wenn die Spannungsquelle bei positiver Strom-Spannungs-Charakteristik den für die Bildung eines Plasmakanals ausreichend hohen Strom liefert. In Starkstromkreisen ist daher beim Öffnen von Schaltern sowie nach einem Durchschlag von Isolierungen immer mit Lichtbögen zu rechnen.

In Lichtbogen-Stromrichtern muss der Stromkreis durch die Zündung einer elektrischen Entladung periodisch geschlossen und anschließend wieder unterbrochen werden. Erfahrungen mit der in Bild 5 gezeigten Anordnung legten es nahe, die Löschung des Lichtbogens durch eine starke Luftströmung zu erzwingen und anschließend eine rasche Wiederverfestigung der Strecke zu erreichen.

Die weiteren Braunschweiger Forschungsarbeiten waren daher ganz auf diese Aufgabe ausgerichtet.

Das Prinzip der nach diesen Überlegungen entwickelten Lichtbogenkammer mit Ausströmöffnungen an jeder Elektrode zeigt Bild 6: Der Lichtbogen 1 wird durch einen Zündimpuls im Takt der Wechselspannung zwischen den Hauptelektroden eingeleitet. Er wird von einer schnellen Luftströmung 3 innerhalb der in den Hauptelektroden 2 eingelassenen Düsen umgeben, wodurch die Entladung räumlich stabilisiert wird. Aufgabe der Schirmelektrode 4 ist die optimale Führung der Gasströmung sowie die zur Verringerung des Abbrands der Hauptelektroden erforderliche Abschirmung der Lichtbogenfußpunkte. Trotz stellenweise intensiver Kühlung des Bogens bleibt die Lichtbogenspannung niedrig und ermöglicht eine sichere periodische Löschung. Die Gleichrichtwirkung kommt dadurch zustande, dass der Lichtbogen nur in jeder zweiten Halbschwingung eingeleitet und wieder gelöscht wird [2].

Bild 7 ist ein Schnittbild, Bild 8 ein Foto der Apparatur, mit der nach 1934 in einer Reihe von weiteren Arbeiten schrittweise eine Verbesserung der für Lichtbogenkammern erwünschten Eigenschaften erreicht wurde [5].

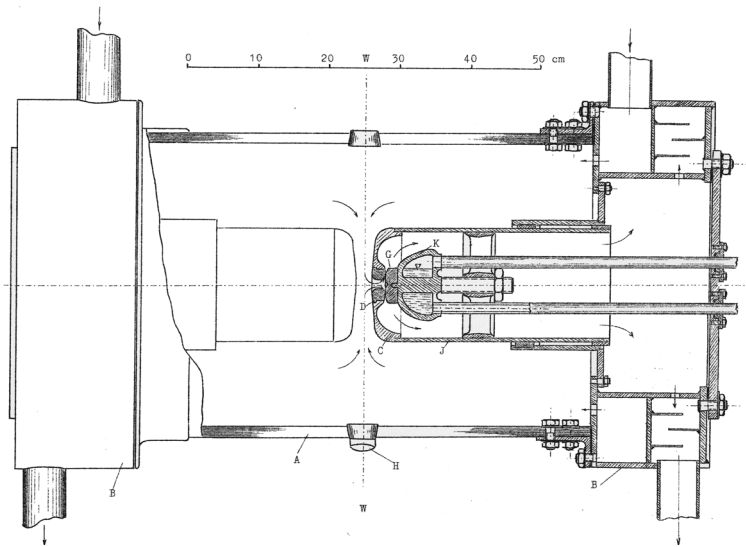


Bild 7: Schnittbild einer Lichtbogenkammer mit düsenförmiger Auslaufströmung an den Hauptelektroden G, C, D = Schirmelektroden, Ausgelegt für 200 kV, 200 A. Quelle: [6].

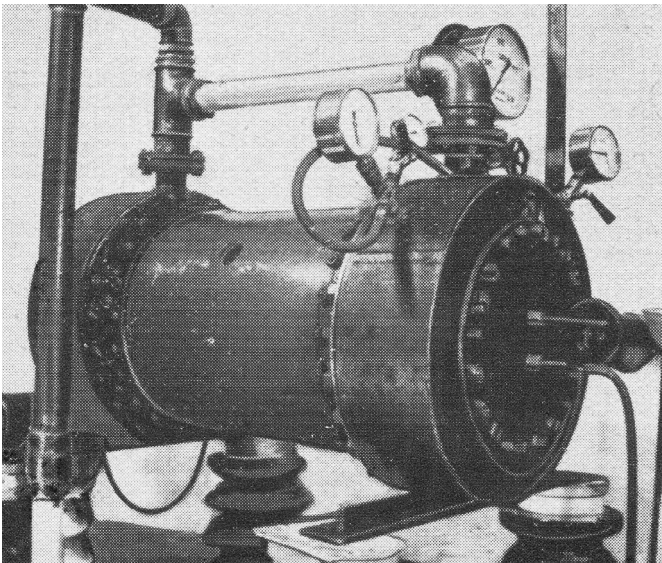


Bild 8: Foto der Versuchsanordnung mit Lichtbogenkammer nach Bild 6 Quelle: [6].

Das Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der Form von Schirm- und Hauptelektroden sowie der Luftströmung auf Lichtbogenverluste und Sperrfähigkeit der Strecke zu ermitteln. Lichtbogenkammern dieser Art zeigten Ergebnisse, die die Hoffnung auf das Erreichen günstiger Eigenschaften in Konkurrenz zu den Entwicklungsarbeiten der Industrie an Quecksilberdampf-Ventilen förderten. Ein wichtiges Ergebnis war unter anderem die Erkenntnis, „dass die Mittel zur Lichtbogenlöschung erst kurz vor dem Nulldurchgang des Stroms, der ja durch die Schaltung erzwungen wird, wirksam werden“ dürfen, um den Wirkungsgrad der Umformung nicht zu verschlechtern [5, S.106].

4. Die Entwicklung von Lichtbogenstromrichtern³

Ermutigt durch staatliches Interesse an Fortschritten bei der Übertragung elektrischer Energie über große Entfernungen begannen auch Unternehmen der Elektroindustrie sich mit der Entwicklung von HGÜ-tauglichen Stromrichtern zu befassen. Während die AEG sich zunächst an den Braunschweiger Arbeiten beteiligte, konzentrierten sich andere Firmen auf die Weiterentwicklung von Quecksilberdampf-Ventilen. Natürlich erkannte auch Marx trotz aller Überzeugung von seiner Idee, dass es konkurrierende Entwicklungslinien gab. So schrieb er bereits 1932: *„Inwieweit die Lichtbogen-Ventile wegen ihrer Einfachheit, Widerstandsfähigkeit und wegen ihres geringen Gewichtes bei niedrigeren Spannungen die Quecksilberdampf-Gefäße ersetzen werden, muss die Zukunft zeigen“* [5, S.155].

Die Weiterentwicklung von Lichtbogenstromrichtern für die HGÜ erforderte 1935 jedoch einen erheblich größeren finanziellen Aufwand, um in Leistungsprüfanlagen sowie in Probeübertragungen die Tauglichkeit zu bestätigen. Mit der Bewilligung der erforderlichen Mittel erreichte Marx die Erfüllung materieller Voraussetzungen für die weiteren Arbeiten. Neben der AEG und der DFG beteiligte sich insbesondere auch das Reichsluftfahrtministerium (RLM) an der Finanzierung. Im Zuge der „Wehrhaftmachung“ der Elektrizitätswirtschaft sollte die nur bei Gleichspannung mögliche Verkabelung von Hochspannungsfreileitungen vor Luftangriffen schützen [7, S.266, S.311].

Eine neue Ersatzprüfschaltung mit zwei getrennten Stromquellen für den abzuschaltenden Strom und die wiederkehrende Spannung erfüllte die Voraussetzung für weitere Entwicklungen zu Stromrichtern mit höheren Leistungen [8]. Noch

3 Auf der Grundlage eines ausführlichen Quellenstudiums hat Helmut Maier in seiner 1993 als Monografie erschienenen Dissertation die durch viele Forschungsarbeiten und deren technische Umsetzung vollzogenen Entwicklungsschritte ausführlich beschrieben [7]. Darüber hinaus untersucht und bewertet er den durch die NS-Politik bestimmten politisch-ökonomischen Kontext.

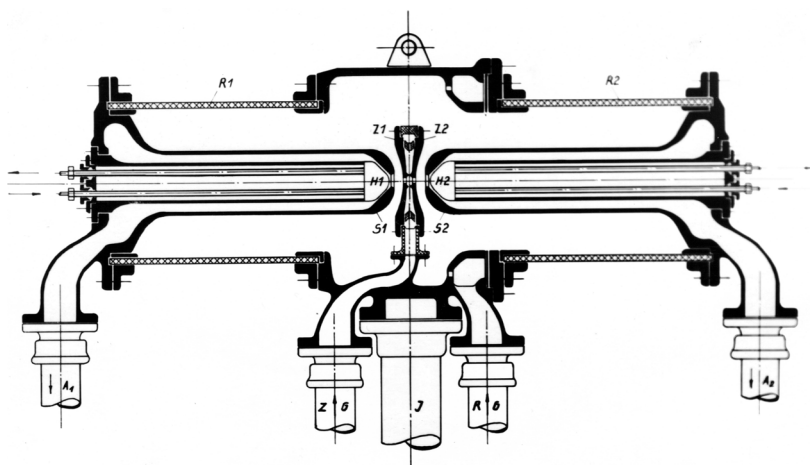


Bild 9: Lichtbogenkammer mit 2 Teilstrecken („Zwillingsventil“). Legende im Text. Quelle: [11], [9], [13].

immer aber konnte das Kernproblem des Abbrands der Elektroden und damit des eingeschränkten Dauerbetriebs nicht überzeugend gelöst werden. Diese Bedenken veranlassten offenbar den Industriepartner AEG im Jahre 1937, die Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern selbst wieder aufzunehmen.

Schaltversuche mit einer in Bild 9 gezeigten neuen Konstruktion der Lichtbogenkammer hatten inzwischen zu deutlich verbesserten Ergebnissen geführt [9,10]. Durch die Anordnung der mit einem eigenen Luftstrom betriebenen Zündeletroden Z, die zwischen den Hauptelektroden H angeordnet waren, entstand eine Reihenschaltung von zwei Teilstrecken. Zusammen mit den Schirmelektroden S ergaben sich gute Strömungsbedingungen für die Löschung des Hauptlichtbogens und die anschließende Wiederverfestigung der Strecke. Das für die Zündeletroden erforderliche „Radialgas“ RG wurde über den die Kammer tragenden Isolator, der Hauptgasstrom A über die Endflansche parallel zu den Stromanschlüssen geleitet. Die Aufteilung des Lichtbogens in zwei Teilstrecken erbrachte insbesondere bei der Rückzündungsfestigkeit eine erhebliche Verbesserung [11].

Ein großer Erfolg für die Bemühungen um den Nachweis der praktischen Einsatzmöglichkeiten der Lichtbogenstromrichter war die Genehmigung der Reichswerke „Hermann Göring“ (HGW), auf ihrem Gelände in Hallendorf bei Watenstedt Versuche an der 100 kV- Sammelschiene durchzuführen, wo die erforderlichen Energiemengen zur Verfügung standen [7, S.182]. Der Bau begann im Oktober 1940. Auf dem Gelände, das neben der Umspannstation Hallendorf lag, wurden ein Stromrichter- und ein Gebläsehaus sowie ein Freiluftschaltfeld und die erforderlichen Vor- und Belastungswiderstände errichtet. Währenddessen gingen

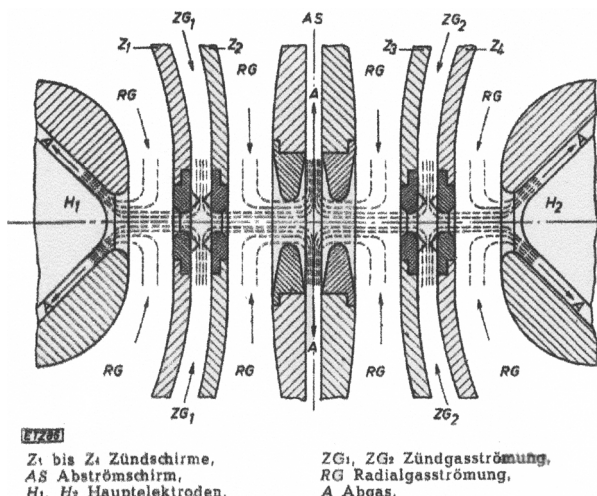


Bild 10: Lichtbogenkammer mit 4 Teilstrecken. Ausgelegt für 400 kV, 600 A. Quelle: [12].

Neubau und Erprobung von Ventilen sowie der Aufbau von Versuchsanlagen im Hochspannungsinstitut weiter [7, S.185].

Das Prinzip, den Hauptlichtbogen durch die Reihenschaltung von mehreren Teilstrecken zu unterteilen, hat sich nach in den Jahren 1941 bis 1943 durchgeführten Versuchen mit Leistungen bis 15 MW und 75 kV Gleichspannung als erfolgreich bewiesen. Bild 10 zeigt die für 400 kV und 600 A entwickelte Lichtbogenkammer mit vier Teilstrecken [12]. Dieser Aufbau bedeutete aber auch eine weitere Steigerung des Aufwandes für Konstruktion, Fertigung und Betrieb. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Reihenschaltung zu einer Erhöhung der Betriebssicherheit führte, da bei dem Ausfall einer Teilstrecke die Übertragung insgesamt störungsfrei weiter betrieben werden konnte. Das entwickelte Hochdruck-Lichtbogenventil erreichte die für eine HGÜ erforderliche zuverlässige Löschung zu einem genau bestimmbar definierten Zeitpunkt.

Wesentliche Nachteile der Lichtbogenstromrichter gegenüber Quecksilberdampf-Ventilen blieben allerdings der durch den Stromverbrauch der Druckluftpumpen schlechtere Wirkungsgrad und vor allem der die Betriebsdauer einschränkende Abbrand der Hauptelektroden.

Im Hinblick auf die „schon vielfach erörterte elektrische Kraftübertragung Norwegen-Deutschland“, hatte Marx bereits im August 1940 einen Antrag zur Bewilligung von Mitteln zur Errichtung einer leistungsstarken Großversuchsanlage unter Einbeziehung des 220 kV-Netzes der HGW gestellt [7, S. 199]. Auf der

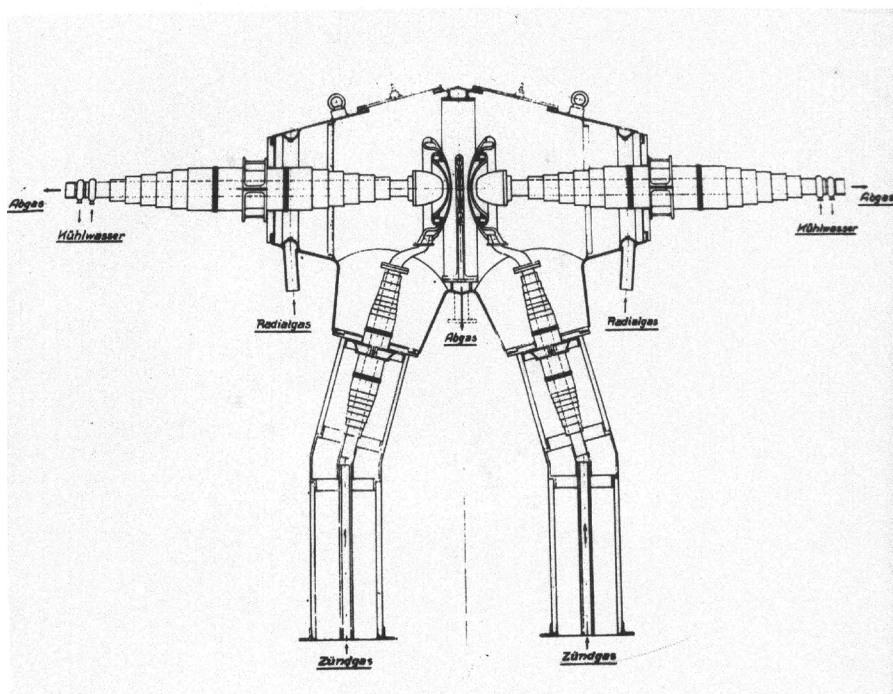


Bild 11: Schnittbild eines Lichtbogenstromrichters mit dem in Bild 10 gezeigten Hochdruckventil (Bauhöhe etwa 3 m).

Grundlage der schließlich erreichten Verbesserungen bewilligte das Reichsamt für Wirtschaftsausbau (RWA) 1942 Mittel für die Entwicklung neuer Ventile, die für eine Dauerversuchsanlage mit Gleich- und Wechselrichterstationen im 220 kV-Netz vorgesehen waren (Bild 11). Nahe der Umspannstation Hallendorf wurden für die „220 kV-Versuchsanlage Hallendorf“ wieder ein Stromrichter- und ein Gebläsehaus sowie ein Freiluftschaltfeld und die Vor- und Belastungswiderstände errichtet.

1943 musste das Projekt „Hallendorf-Lehrte“ wegen des Mangels an Arbeitskräften jedoch auf die Aufstellung von Gleich- und Wechselrichtern in der Versuchsanlage Hallendorf mit je 3 Ventilen reduziert werden. Diese sollten über eine vorhandene 45 km lange 220 kV-Leitung von Hallendorf nach Lehrte im Kreisbetrieb mit 300 kV Gleichspannung betrieben werden [7, S.201]. Infolge der völligen Überlastung der Elektroindustrie mussten wichtige Komponenten bei Schweizer Firmen bestellt werden [7, S.203]. Obwohl die Anlage „Hallendorf-Lehrte“ nahezu einschaltbereit war, hat sie ihre für Mai 1945 geplante Inbetrieb-

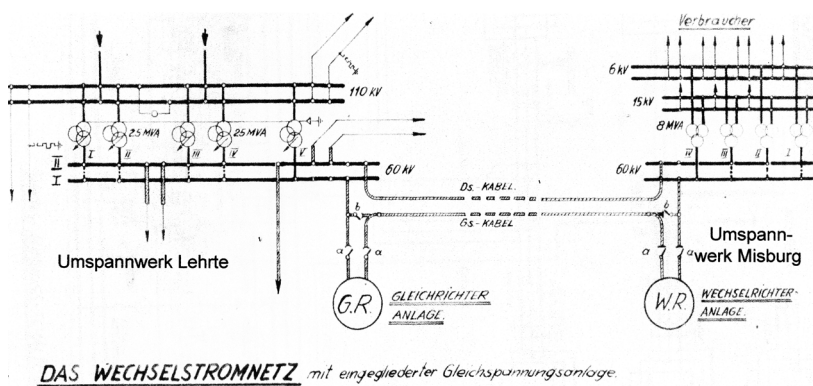


Bild 12: Schaltbild der HG -Versuchsstrecke Lehrte-Misburg 1943 [9].

nahme nicht erlebt und ist auch nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs nicht mehr weiter betrieben worden.

5. Lehrte-Misburg, die erste HGÜ-Versuchsanlage über 10 MW im Netz

Zuverlässige Stromrichter für hohe Spannungen und Übertragungsleistungen sind zwar eine notwendige aber keine hinreichende Voraussetzung für eine HGÜ. Zum Studium aller bei einer vollständigen Anlage auftretenden Teilprobleme hatte Marx bereits im Juli 1940 finanzielle Mittel für die Errichtung einer vollständigen HGÜ-Versuchsanlage in einem Mittelspannungsnetz beantragt. In seinem Antrag an das RWA heißt es:

Bevor an den Bau einer Großanlage herangegangen werden könne, müssten die Ventile mit ihren Zündanlagen, die Gebläse, Kühler und Filter im langen Dauerbetrieb erprobt werden. Überdies sollten Erfahrungen über die Zündsteuereinrichtung, Sicherheitsmaßnahmen, Gaszusammensetzung, Korrosionserscheinungen, Elektrodenabbrand und den Einsatz des Blindleistungs-Stromrichters gesammelt werden [7, S.191].

Die Preußenelektra plante zu dieser Zeit die Verlegung eines zweiten 60 kV-Kabels parallel zu einem vorhandenen zwischen den östlich von Hannover gelegenen Umspannstationen Lehrte und Misburg. Es wurde vereinbart, dass dieses parallel liegende Kabel für die von Marx geplante HGÜ-Versuchsanlage verwendet werden sollte. Eine ausführliche Dokumentation über den Aufbau und den Betrieb der Anlage sowie über die in den Jahren 1942 bis 1944 durchgeführten Versuche

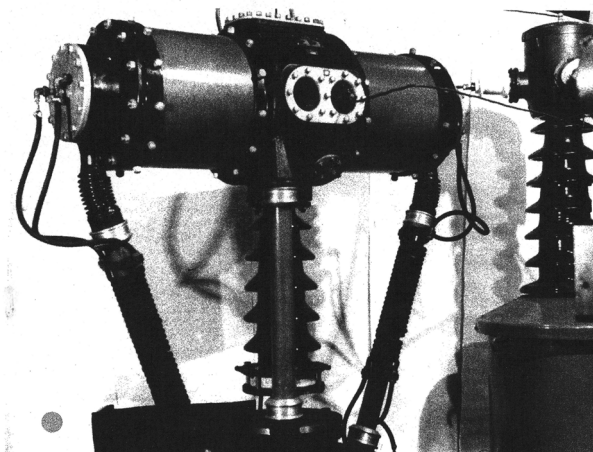


Bild 13: Lichtbogenstromrichter mit Zündtransformator für Versuche zur Betriebssicherheit.

und deren Ergebnisse verdanken wir der umfangreichen Dissertation von Adil Erk, aus der viele der nachfolgenden Informationen gewonnen wurden [9,10].

Bild 12 zeigt die 110/60 kV-Umspannwerke mit den beiden 5 km langen 60 kV-Kabelstrecken, von denen eines durch Zwischenschaltung von Stromrichtern als Gleichstromkabel mit 75 kV und etwa 12 MW Übertragungsleistung betrieben werden sollte. Die Gleich- und Wechselrichter wurden mit je sechs für 100 kV und 200 A Gleichstrom bemessenen Hochdruck-Lichtbogen-Ventilen aufgebaut (Bild 13) [9]. Zum Schutz gegen Rückwirkungen von Betriebsstörungen in den Stromrichtern auf die Stromversorgung im Drehstromnetz mussten zusätzliche Einrichtungen eingebaut werden, deren Bereitstellung wiederholte Verschiebungen der Inbetriebnahme zur Folge hatten (Bild 14).

Obwohl dank der guten Zusammenarbeit mit der Preussenelektra die geplanten HGÜ-Versuche im Megawattbereich überhaupt erst möglich wurden, bedeutete die geforderte unbedingt zuverlässige Stromversorgung des Umspannwerks Misburg erhebliche Einschränkungen bei der Versuchsdurchführung. Das erkennt man auch an den Tageszeiten der von 1 bis zu 6 Stunden durchgeführten Dauerversuche, die meist nachts stattfanden.

Bei den Versuchen im Dauerbetrieb traten gemäß dem Charakter der Anlage als Probebetrieb zahlreiche Probleme auf. Es wurde im Durchschnitt eine Leistung von 6 bis 7 MW, im Höchstfall 12 MW übertragen. Betriebsprobleme an den Ventilen selbst ließen sich durch Erhöhung des Druckes und der Zündgasge-

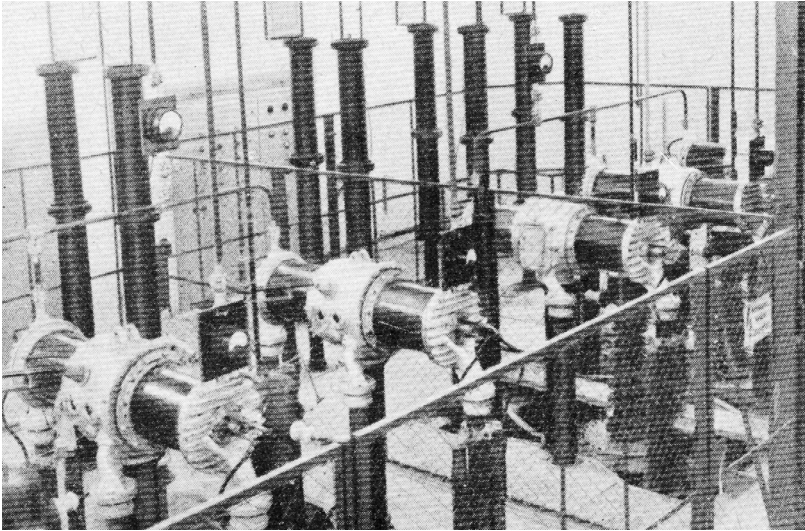


Bild 14: Ventilhalle der HGÜ-Versuchsanlage Lehrte-Misburg 1943 Quelle: [10].

schwindigkeit beseitigen. Bis Juni 1944 entwickelte sich der Versuchsbetrieb in der Art, dass von täglichen stundenweisen Versuchen auf Dauerversuche von 2–3 Tagen übergegangen wurde [7, S. 198].

Am 18. Juni 1944 wurde das Umspannwerk Misburg durch Bombentreffer schwer beschädigt, eine Wiederaufnahme des Versuchsbetriebs kam nicht infrage. Die nüchternen Worte, die Erk in seiner 1945 geschriebenen Dissertation für diese Situation fand, lassen die äußeren Umstände nur erahnen: „Der geplante längere ununterbrochene Dauerbetrieb konnte leider infolge von Kriegseignissen nicht durchgeführt werden“ [9].

Obwohl der Betrieb der HGÜ-Versuchsanlage „Lehrte-Misburg“ vor Abschluss der geplanten Untersuchungen abrupt abgebrochen werden musste, darf man zu Recht das ganze Vorhaben als einen Meilenstein der HGÜ-Technik ansehen.

6. Zusammenfassung und Rückschau

Eine wirtschaftliche, sichere und umweltschonende Stromversorgung ist nicht erst seit heute eine für eine Industriegesellschaft wichtige Aufgabe. Sich ihr unabhängig von politischen Verhältnissen zu widmen, stellt eine Herausforderung für Wissenschaftler und Ingenieure dar.

Die Begeisterung für die Mitarbeit an der Entwicklung der HGÜ war sicher eine wesentliche Triebfeder für leitende Ingenieure in Wissenschaft und Industrie. Bei Prof. Marx kam hinzu, dass er durch persönliches Engagement und Verhandlungsgeschick die Bewilligung von aufwendigen Forschungsprojekten erreichen konnte, deren „Kriegswichtigkeit“ auch ihm zweifelhaft gewesen sein dürfte. Einer seiner späteren Doktoranden stellte fest: *„Marx war zeitlebens ein Pragmatiker, der seine Ziele mit Hartnäckigkeit verfolgte. Dabei verfügte er über eine beachtliche Eloquenz und eine beeindruckende Überzeugungskraft“* [14].

Während des Zweiten Weltkriegs wurde neben der Entwicklung der Marxschen Lichtbogenstromrichter auch die von der Industrie betriebene Entwicklung von Quecksilberdampf-Stromrichtern durch staatliche Stellen massiv gefördert. Dies geschah in der irrealen Annahme, die HGÜ-Technik könnte kurzfristig wegen der Möglichkeit einer Kabelverlegung von Freileitungen von militärischer Bedeutung sein. Maßnahmen der Förderung waren nicht nur die Bewilligung großer finanzieller Mittel, sondern auch die vorrangige Bereitstellung industrieller Produkte und nicht zuletzt die Befreiung hervorragender Ingenieure vom Wehrdienst.

Die Lichtbogenstromrichter nach Prof. Marx haben sich in nur 15 Jahren aus Grundlagenuntersuchungen zu bemerkenswerten Hochleistungsschaltgeräten entwickelt. Ihr physikalisches Wirkungsprinzip wurde auch für andere Anwendungen, insbesondere für Leistungsschalter, richtungweisend. Die auf Grund ihres Aufbaus erwartete Eignung für hohe Übertragungsleistungen erneuerte jedenfalls in den 1930er Jahren das Interesse an Gleichstromübertragungen über große Entfernungen, darunter vor allem Planungen zur Nutzung Norwegischer Wasserkräfte über HGÜ zur Deckung des Strombedarfs von Deutschland [7, S.70].

Merkmale für die Entwicklungen von Prof. Marx und Mitarbeitern waren umfangreiche zielgerichtete experimentelle Untersuchungen, die schrittweise zu Verbesserungen führten. Sie waren anstelle der damals noch nicht verfügbaren theoretischen Hilfsmittel von intuitivem Verständnis der physikalischen Prozesse in Lichtbogenentladungen gekennzeichnet.

Bei Kriegsende standen sowohl die Marxschen Lichtbogenstromrichter als auch die Quecksilberdampf-Stromrichter vor weiteren Versuchen, die jede der beiden Arbeitsgruppen als aussichtsreich bewertete [10]. Während die Braunschweiger Arbeiten als Folge des politischen Zusammenbruchs endgültig abgebrochen werden mussten, bestanden die von den Firmen AEG und Siemens für „Elbe-Berlin“ entwickelten Quecksilberdampf-Stromrichter schließlich 1950 ihre Bewährungsprobe in der HGÜ „Kashira-Moskau“. Hier wurde erstmals die Übertragungsleistung von „Lehrte Misburg“ übertroffen. Damit war der „Konkurrenzkampf“ zwischen beiden Ventillösungen eindeutig zugunsten der Quecksilberdampf-Ventile entschieden, bis diese etwa 30 Jahre später wiederum von der Halbleitertechnik abgelöst wurden.



Bild 15: Erwin Marx, 1893–1980, ein Pionier der Hochspannungs- Gleichstromübertragung (Foto 1973)

Die Braunschweiger Arbeitsgruppe wurde 1945 aufgelöst, die zum Teil sehr großen Versuchsgерäte wurden später verschrottet. Wegen der verordneten strengen Geheimhaltung der Arbeiten erschienen Veröffentlichungen über die Braunschweiger Entwicklungsergebnisse erst nach Kriegsende (z.B. [7], [10] und [13]).

Prof. Marx konnte aus politischen Gründen – „*er war mit Sicherheit kein Gegner des Nationalsozialismus*“ [14] - seine Aufgabe als Leiter des Hochspannungsinstituts zunächst nicht weiterführen, wurde jedoch 1948 wieder „ohne weitere Beschränkungen eingereiht“ [15]. Er setzte sich bis zu seiner Emeritierung 1962 weiterhin für die HGÜ-Technik ein. 1966 wurde ihm der VDE-Ehrenring „in Anerkennung seiner grundlegenden Arbeiten auf den Gebieten der Stromrichter- und Schaltertechnik und der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung“ verliehen. Das Foto Bild 15 zeigt ihn bei einer Veranstaltung aus Anlass seines 80. Geburtstags im traditionellen Hörsaal des Braunschweiger Hochspannungsinstituts.

Der Verfasser dankt Prof. Dr.-Ing. Jürgen Salge, Braunschweig, sowie Prof. Dr. rer.nat. Helmut Maier, Bochum, für hilfreiche Anmerkungen zum Manuskript.

Literatur

- [1] MARX, E.: Das Institut für elektrische Messkunde und Hochspannungstechnik der TH-Braunschweig, Festschrift 1929, S. 13–62.
- [2] ERK, A. & A. KIND: Forschung und Entwicklung am Hochspannungsinstitut der Technischen Hochschule Braunschweig, ETZ-A 84 (1963), H.4, S. 99–107.
- [3] GÖSCHEL, H.: Dem Lehrer und Forscher Erwin Marx zum 70. Geburtstag. ETZ-A 84 (1963) H.4, S. 97.
- [4] MARX, E.: Der elektrische Durchschlag von Luft im inhomogenen Felde. Arbeiten aus dem Hochspannungsinstitut der TH-BS, Bd.I, 1931, S.41–50.
- [5] MARX, E.: Lichtbogen-Stromrichter für sehr hohe Spannungen und Leistungen. Springer-Verlag 1932.
- [6] MEYER, H.W.: Die Sperrspannung des Marxschen Lichtbogenstromrichters neuer Bauart. Diss. TH-BS 1934.
- [7] MAIER, H.: Erwin Marx (1893–1980), Ingenieurwissenschaftler in Braunschweig, und die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der elektrischen Energieübertragung auf weite Entfernungen zwischen 1918 und 1950. GNT-Verlag Stuttgart 1993.
- [8] MARX, E.: Eine Ersatzschaltung für die Prüfung von Hochleistungsventilen und Hochleistungsschaltern. ETZ Jg. 57 (1936), S.583–586.
- [9] ERK, A.: Untersuchung einer Gleichstrom -Übertragungsanlage für 80 kV und 16000 kW mit Hochdruck-Lichtbogenventilen. Diss. TH-BS 1946.
- [10] ERK, A.: Versuchsanlagen für die Gleichstrom-Hochspannungs-Übertragung unter Verwendung von Hochdruck-Lichtbogenventilen nach Marx. Bull. SEV 38 (1947), Nr.11, S. 295–308.
- [11] TRAUPE, W.-H.: Lichtbogenlöschung mit strömendem Gas. Diss. TH-BS 1938.
- [12] TOLAZZI, H.: 15 MW-Drehstrom-Gleichrichteranlage für 75 kV Gleichspannung mit Hochdrucklichtbogenventilen. Diss. TH-BS 1946 (s. auch ETZ Jg.70 (1949), S. 334–337).
- [13] BAUDISCH, K.: Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung. Springer-Verlag 1950.
- [14] SCHÜTTE, H.: Kritische Betrachtungen zu einer Aufarbeitung von Technikgeschichte. Mitt. tech.-wiss. Vereine, No.3 1992, S.8–9.
- [15] WESSELHÖFT, D.: Von fleißigen Mitmachern, Aktivisten und Tätern. Georg Olms Verlag 2012.

Anmerkung: Bilder ohne Quellenangabe sind dem Archiv des Hochspannungsinstituts entnommen.

Israel und die (amerikanisch-)jüdische Diaspora*

– Einheit oder Entfremdung ? –

GUNTHER KÜHNE

Geheimrat-Ebert-Str. 14, D-38640 Goslar

I. Einleitung: Israel und seine nahöstliche Umgebung

Seit über einem Jahrhundert wird der Nahe Osten wesentlich durch eine Auseinandersetzung geprägt, für die man heutzutage den Begriff des Nahost-Konflikts verwendet. Die auslösenden Faktoren reichen mit dem Anstieg der jüdischen Besiedlung Palästinas in das ausgehende 19. Jahrhundert und mit dem Zerfall des Osmanischen Reiches in das frühe 20. Jahrhundert hinein.¹ Folgewirkungen dieser Ereignisse waren die weitere Zunahme der jüdischen Einwanderung insbesondere unter der Einwirkung der nationalsozialistischen Judenverfolgung in den 30er und 40er Jahren und das Eindringen europäischer Kolonialmächte (Großbritannien, Frankreich) in den nahöstlichen Raum über Völkerbundmandate zur treuhänderischen Verwaltung ehemals osmanischer Teilgebiete (Großbritannien: Palästina, Irak; Frankreich: Syrien). Auch der auf den ersten Blick salomonisch wirkende Beschluß der Vereinten Nationen vom November 1947, Palästina in einen jüdischen und einen arabischen Staat aufzuteilen, führte nicht zu einer Beruhigung, geschweige denn zu einer Lösung des Konflikts. Im Gegenteil: Die fortbestehende arabische Ablehnungsfront gegenüber Israel und der seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts heraufziehende und sich stetig verschärfende Gegensatz zwischen dem Westen und der islamischen Welt haben den Konflikt zwischen Israel und den Palästinensern in eine Mehrebenen-Konfrontation ausgeweitet: Neben dem unmittelbaren Nachbarschaftskonflikt mit den Repräsentanten der Palästinenser (Fatah im Westjordanland, Hamas in Gaza) sieht sich Israel in einen Konflikt mit mehreren unmittelbar oder mittelbar umgebenden Staaten wie dem in vielfacher Hinsicht von der Hamas kontrollierten Libanon, Syrien und dem Iran gestellt. Diese islamische Front wird wiederum durch Allianzen untereinander, z.B. Iran-Syrien, geprägt.

* Eingegangen: 17.01.2014. Überarbeitete, aktualisierte und durch Fußnoten ergänzte Fassung des am 08.02.2013 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrages. Die Abhandlung baut auf einem Essay des Verfassers auf, der in der Zeitschrift „Tribüne“, 51. Jahrg. (Heft 204), 2012, S. 104 ff., unter dem Titel „Der gestörte Dreiklang: Israel – USA – Judentum“ erschienen ist.

¹ Zur Frühzeit und Entwicklung der zionistischen Bewegung vgl. Kühne, BWG, Jahrbuch 2010, S. 93 ff.

Mit dem Einsetzen der revolutionären Bewegungen in zahlreichen arabischen Ländern (Arabellion) im Frühjahr 2011 verband sich im Westen vielfach die Hoffnung, die dortige Entwicklung hin zu demokratischen Verhältnissen und Strukturen würde auch die Lösung des Nahostkonflikts erleichtern. Bereits heute, am Ende des Jahres 2013, läßt sich feststellen, daß diese Hoffnung getrogen hat. Statt des erhofften Aufschwungs der Demokratie in diesen Ländern muß man nüchtern feststellen, daß sich heute ein Landbogen von Afghanistan über Pakistan, den Iran, Syrien, den Irak, Libanon, Ägypten, Libyen, den Maghreb bis zum saharischen Afrika spannt, der aus Staaten besteht, die sich in Aufruhr und Gärung befinden und zum großen Teil durch verschiedenartigsten religiösen Fanatismus und zerrüttete Zivilgesellschaften geprägt sind. Darüber sind sogar in der Vergangenheit schon erzielte friedliche und verhältnismäßig stabile Koexistenzverhältnisse etwa zwischen Israel und Ägypten wieder unsicher geworden. Ob und wie lange die äußerlich ruhigen Verhältnisse in einigen Ländern wie Jordanien und Saudi-Arabien so bleiben werden, kann heute niemand voraussagen. Eines der übergreifenden Kennzeichen der Entwicklung in der arabischen Welt ist es, daß der Zerfall oder Zusammenbruch gesamtstaatlicher Ordnungen in erheblichem Umfang vormoderne Denk- und Gesellschaftsstrukturen bis hin zu Tribalisierungstendenzen, z.B. in Libyen, hervortreten läßt.

Wendet man sich der anderen Seite des Nahost-Konflikts – dem Staate Israel – zu, so wird der Gegensatz zu den arabischen Nachbarn sehr häufig dahin umschrieben, daß es sich bei Israel um die einzige funktionierende Demokratie und den einzigen Rechtsstaat westlichen Zuschnitts in der nahöstlichen Region handelt. So richtig diese Feststellung ist, so ist sie doch gleichzeitig geeignet, Fehlvorstellungen über den inneren Zustand Israels zu nähren und z.T. bedenkliche neuere Tendenzen der inneren politischen und gesellschaftlichen Struktur des Landes zu überdecken.

Schließlich ist gerade im Falle Israels auf eine weitere Schicht innerhalb des mehrschichtigen Nahost-Konflikts zu verweisen. Beide Konfliktseiten haben außerregionale Unterstützungsmächte. Auf der arabischen Seite ist es partiell Rußland, etwa im Falle Syrien, und auf israelischer Seite sind es vor allem die USA. Die Stellung der USA im Verhältnis zu Israel gründet sich z.T. auf eine beide Länder verbindende Wertegemeinschaft und auf geostrategische Interessen der USA in der Region. Vor allem aber ist es der Umstand, daß die USA mit einer jüdischen Bevölkerung von etwa 6,7 Mio. neben Israel beinahe die zweite Hälfte des jüdischen Volkes beherbergt. Diese starke jüdische Diaspora verleiht den USA aus israelischer Perspektive eine einzigartige Bedeutung.

II. Das Verhältnis Israel – USA und die jüngste literarische Israel-Kritik

Während der ersten Jahrzehnte nach der Gründung des Staates Israel im Mai 1948 waren die Beziehungen zwischen dem jungen Staat und den USA weithin

ungetrübt und eng. Bereits im Umfeld der Entstehung des jüdischen Staates hatten die USA unter der Präsidentschaft Harry S. Trumans eine besonders förderliche Rolle gespielt. Einen gewissen Anteil hat daran wohl auch ein schlechtes Gewissen darüber gehabt, daß die USA Ende der 30er Jahre durch eine restriktive Einwanderungspolitik zahlreiche jüdische Verfolgte des Nazi-Regimes der Vernichtung anheimgegeben haben. Verstärkt wurde die pro-israelische Haltung durch das Zusammengehörigkeitsgefühl der beiden Völker als Teile einer Wertegemeinschaft in Zeiten des Kalten Krieges und gemeinsame geostrategische Interessen als Gegengewicht gegen die Ausdehnung der sowjetischen Einflußsphäre in der arabischen Welt (Ägypten, Syrien). Allerdings schloß die amerikanisch-israelische Allianz punktuelle Spannungen und Krisen nicht aus, wie z.B. im Jahre 1956, als sich die israelischen Truppen auf Geheiß Präsident Eisenhowers von der im Zuge des Suez-Krieges eroberten Sinai-Halbinsel zurückziehen mußten.

Eine wesentliche und existentielle Stütze des Verhältnisses beider Länder zueinander bildete der Umstand, daß aufgrund der Umwälzungen des 2. Weltkrieges Israel und die USA die beiden neuen Bevölkerungszentren des jüdischen Volkes geworden waren,² welche sich durch das traumatische Erlebnis des Holocaust als unauflöslich miteinander verbunden empfanden. Es war gerade dieser Stützpfeiler der gegenseitigen Beziehungen, der im Jahre 1967 zu großer Bedeutung gelangte, als Israel im Sechs-Tage-Krieg die arabischen Armeen in kürzester Zeit vernichtend schlagen konnte und damit zum ersten Mal seit zwei Jahrtausenden wieder in den Besitz der heiligen Stätten des Judentums gelangte. Dies löste eine Welle des Zusammengehörigkeitsgefühls unter den Zentren der jüdischen Bevölkerung in der Welt aus, allen voran zwischen Israel und dem US-amerikanischen Judentum.

Es entbehrt denn auch nicht einer gewissen Tragik, daß gerade der Sieg der israelischen Truppen im Sechs-Tage-Krieg und seine politischen Wirkungen der Ausgangspunkt einer krisenhaften Entfremdung zwischen den Repräsentanten der vormaligen „Dreieinigkeit“ – Israel, USA, Judentum – geworden ist – eine Entfremdung, die sich seit den 70er Jahren mit Unterbrechungen weiterentwickelt hat. Sie begann bereits Anfang der 70er Jahre mit der verzögerten Hilfe der amerikanischen Nixon-Administration – Henry Kissinger war damals Außenminister – für das an den Rand der Niederlage getriebene Israel zu Beginn des Yom-Kippur-Krieges im Oktober 1973. Unter der Einwirkung der geostrategischen Folgen der Ölkrise 1974/74 und 1979 und der mit dem Antritt der *Begin*-Regierung im Frühjahr 1977 eingeleiteten Veränderung der innenpolitischen Koordinaten Israels ist das Verhältnis zwischen beiden Staaten deutlich angespannter geworden. Dies gilt auch für das Verhältnis zwischen den jüdischen Gemeinschaften in Israel und

² Im Jahre 1933 waren ca. 90% der jüdischen Weltbevölkerung in Europa ansässig. Heute leben ca. 85% in Israel und in den USA.

in den USA. Einen vorläufigen Höhepunkt hat diese Entwicklung im Jahre 2009 mit dem Regierungsantritt *Benjamin Netanjahus* erreicht – eine Entwicklung, die weiterhin andauert.

Die damit einhergehende Entfremdung sowohl zwischen beiden Staaten als auch zwischen beiden religiösen Gemeinschaften hat in jüngster Zeit nicht zufällig vor allem in den USA eine Vielzahl literarischer Zeugnisse hervorgebracht, die sich überaus kritisch mit der Entwicklung Israels und deren Auswirkungen auf die politische und gesellschaftliche Verfassung des Landes und auf das Verhältnis zum US-amerikanischen Judentum auseinandersetzen. Zu den beharrlichsten und meistbeachteten Kritikern der politischen und gesellschaftlichen Entwicklung Israels und seiner treuen Unterstützer innerhalb des amerikanischen Judentums gehört der amerikanisch-jüdische Politikwissenschaftler und Journalist *Peter Beinart*. Im Anschluß an seinen vielbeachteten Essay über „The Failure of the American Jewish Establishment“ aus dem Jahre 2010³ hat er seine Kritik in seinem Buch „The Crisis of Zionism“ im Jahre 2012⁴ erneuert und ausgebaut. Darin beklagt er die zunehmende Außerachtlassung demokratischer und rechtsstaatlicher Prinzipien durch die israelische Politik in den besetzten Gebieten (Siedlungspolitik !) und die damit einhergehende Entfremdung zwischen den Israel unterstützenden, zumeist orthodoxen Kreisen des amerikanischen Judentums und dem liberalen amerikanisch-jüdischen Mainstream. Insbesondere der dieser mehrheitlichen Richtung zugehörenden jüngeren Generation amerikanischer Juden gilt die Zukunftssorge des Autors. Die im Herbst 2013 erschienene deutsche Ausgabe mit dem Titel „Die amerikanischen Juden und Israel“⁵ trifft denn auch diese Stoßrichtung seiner Ausführungen deutlich genauer. In eine ähnliche Richtung weist das jüngste Buch des amerikanisch-jüdischen Politikwissenschaftlers *Norman Finkelstein*,⁶ der seit langem als vehementer Kritiker Israels, vor allem des von ihm mit dem Schlagwort „Holocaust-Industrie“ belegten Umgangs maßgebender jüdischer Kreise mit der Shoa, bekannt ist. In seinen Darlegungen analysiert der Autor die Gründe für das von ihm erwartete Ende der „Romanze“ zwischen dem amerikanischen Judentum und Israel. Ganz auf die kritische Beleuchtung der politischen und gesellschaftlichen Entwicklung Israels konzentriert ist das kürzlich in deutscher Übersetzung mit dem unglücklich an das Buch von Sarrazin anklingenden Titel „Israel schafft sich ab“⁷ erschienene Buch des aus den USA

³ The New York Review of Books, June 10–23, 2010 (Band LVII, No. 10).

⁴ The Crisis of Zionism, Times Books, Henry Holt & Company, New York 2012; er hat seine Hauptargumentation jüngst in dem Essay „The American Jewish Cocoon“ in: The New York Review of Books, September 26, 2013 (Band LX, No. 14) erneut vorgetragen.

⁵ C.H. Beck-Verlag, 2013.

⁶ Knowing Too Much – Why the American Jewish Romance with Israel is Coming to an End –, OR Books, New York, London, 2012.

⁷ Campus Verlag, Frankfurt, New York, 2012.

stammenden israelischen Historikers *Gershom Gorenberg* mit dem Titel „The Unmaking of Israel“⁸. In seiner Kritik an Israel tritt er – ähnlich wie *Beinart* – für einen „liberalen Zionismus“ ein. In den Chor der amerikanischen/israelischen Kritiker des jüdischen Staates mischen sich jüngst auch kritische Stimmen aus dem europäischen Ausland ein. So hat kürzlich die französisch-jüdische Historikerin *Diana Pinto*⁹ den Verlust der historisch-religiös-weltanschaulich überlieferten Werte innerhalb der israelischen Gesellschaft beschrieben und beklagt.

Eine weitere grundsätzlich angelegte Kritik aus jüngster Zeit an der herrschenden israelischen Praxis des Umgangs mit der palästinensischen Bevölkerungsminorität stammt von der amerikanisch-jüdischen Philosophin *Judith Butler*. In ihrem 2012 erschienenen Buch „Parting Ways – Jewishness and the Critique of Zionism“¹⁰ entwickelt sie eine Argumentation, derzufolge diese Praxis unvereinbar mit überlieferten Wertvorstellungen der Diaspora ist. Auf der Grundlage von Ideen und Überzeugungen *Martin Bubers* und *Hannah Arendts* und unter Einbeziehung von Denkern wie *Edward Said* setzt sie sich für eine politische Ethik der Kohabitation unterschiedlicher ethnisch-religiöser Gruppen innerhalb eines binationalen, arabisch-jüdischen Gemeinwesens ein. Die Kritik *Judith Butlers* dürfte wohl die intellektuell anspruchsvollste, zugleich aber auch diejenige sein, die von den politischen Realitäten des Nahost-Konflikts am weitesten entfernt ist.

III. Die neueren Verschiebungen in der politischen und gesellschaftlichen Landschaft Israels

Die Staatsgründung Israels im Mai 1948 bedeutete keineswegs einen Neubeginn des jüdischen Gemeinwesens auf der Nulllinie. Struktur und politisch-gesellschaftliche Koordinaten waren vielmehr das Ergebnis historischer Erfahrungen (Holocaust) und weltanschaulicher Auseinandersetzungen, wie sie die zionistische Bewegung jahrzehntelang vor der Staatsgründung geprägt haben. Von Anfang an war dieser Zionismus ideologisch außerordentlich zerklüftet. So standen sich etwa religiöse und säkulare Zionisten z.T. unversöhnlich gegenüber, ebenso nationalistisch und internationalistisch gesinnte Kreise. Dieser stark von den verschiedenen Strömungen der Diaspora geformte Kosmos wurde nach dem kräftezehrenden Unabhängigkeitskrieg 1948/49 durch die schweren Aufgaben des Staatsaufbaus bei fortbestehender äußerer Bedrohung in gewisser Weise diszipliniert. Dies sollte

⁸ HarperCollins Publishers, New York, 2011.

⁹ Israël a démenagé, Editions Stock, Paris, 2012; deutsch: „Israel ist umgezogen“, Suhrkamp Verlag, 2013.

¹⁰ Columbia University Press, 2012; deutsch: „Am Scheideweg: Judentum und die Kritik am Zionismus“, Campus Verlag, Frankfurt/M., 2013.

jedoch nicht so bleiben. Israels historische Einschnitte sind wesentlich durch Kriege markiert. Der Sechs-Tage-Krieg im Juni 1967 bedeutete solch einen Einschnitt. Mit dem überwältigenden Triumph des jungen Staates stiegen die Geister aus der Geschichte des Zionismus wieder auf. Über zwei Jahrzehnte waren sie durch die Schatten der Katastrophe zwischen 1933 und 1945 und die Sicherung der Existenz des neuen Staates nach innen und außen eingehegt worden. Wie oft bei historischen Umbrüchen – man denke nur an das frühere Jugoslawien – erwachen abgestorben geglaubte Strömungen unter der Einwirkung bestimmter auslösender Faktoren oder Ereignisse zu neuem Leben. So geschah es auch mit dem durch *Wladimir Zeev Jabotinsky* (1880–1940) repräsentierten revisionistischen Zweig des Zionismus.¹¹ Mit dem Wahlsieg *Menachem Begins*, der ein entschiedener Anhänger *Jabotinskys* war, bei den Parlamentswahlen im Frühjahr 1977 errang diese Richtung des Zionismus, die in ihrer ursprünglichen Form sogar die Wiedereinrichtung eines jüdischen Gemeinwesens in den historischen Grenzen beiderseits des Jordans erstrebte, bestimmenden politischen Einfluß. Dieser ist im Laufe der letzten Jahrzehnte eher gestiegen, wie man auch an kleinen Begebenheiten ablesen kann. So hielt z.B. die Knesset im August 2011 ungewöhnlicherweise eine Gedenkfeier zum 71. (!) Todestag *Jabotinskys* ab. Dieser Einfluß läßt sich auch für Ministerpräsident *Benjamin Netanjahu* ganz persönlich nachweisen. Sein im Jahre 2012 im Alter von 102 Jahren verstorbener Vater, *Ben-Zion Netanjahu*, war Geschichtspräsident und in den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts für einige Zeit Privatsekretär *Jabotinskys*.¹²

Mit dem Regierungsantritt *Menachem Begins* im Frühjahr 1977 begann sich die politische und gesellschaftliche Achse des Landes zu verschieben. Die rechte Seite des politischen Spektrums erstarkte. Begünstigt wurde diese Tendenz durch das Aufbegehren der aus dem Mittelmeerraum und den arabischen Ländern stammenden sephardischen Bevölkerungsteile gegen die aschkenasisch-osteuropäisch-laizistische „Elite“ der Staatsgründer (*David Ben-Gurion*, *Chaim Weizmann*, *Moshe Sharett*, *Golda Meir*)¹³ und später durch die stark zunehmende Zahl der

¹¹ *Jabotinsky* entfaltete neben seiner zionistisch-politischen auch eine umfangreiche schriftstellerische Tätigkeit, die auch Romane umfaßte, so z.B. das gerade neu erschienene Werk „Richter und Narr“ (1927), Kometen der Anderen Bibliothek, Berlin, 2013; dazu die Rezension von *Jakob Hessing* in: FAZ, v. 21.12.2013, S. 33. Während *Hessing Jabotinsky* zu Recht als geistigen Vater der politischen Rechten in Israel bezeichnet, kommen Name und Person *Jabotinskys* erstaunlicherweise in der 2012 erschienenen Darstellung der israelisch-deutschen Historikerin *Tamar Amar-Dahl*, Das zionistische Israel – Jüdischer Nationalismus und die Geschichte des Nahostkonflikts, 2012, Ferdinand Schöningh, Paderborn u.a., überhaupt nicht vor.

¹² Zu der starken Wirkung der Ideen *Jabotinskys* auf *Ben-Zion* und *Benjamin Netanjahu* näher *Beinart*, Die amerikanischen Juden und Israel (oben Fn. 5), S. 121 ff.

¹³ Unter aschkenasischen Juden versteht man die aus Mittel- und Osteuropa stammenden Juden. Bei den sephardischen Juden handelt es sich um die Nachkommen spanischer und portugiesischer Juden, die sich nach der Vertreibung der Juden aus Spanien (1492) über Westeuropa, den Mittelmeerraum und Lateinamerika zerstreut hatten.

dem klassischen links-liberal-bürgerlichen Profil entfremdeten und nach dem Scheitern des Kommunismus ideologisch entwurzelten russischen Einwanderer. Das linke, sozial-progressive Milieu der Einwanderungswellen aus dem späten 19. und der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts trat nicht nur aus biologischen Gründen den Rückzug an. Verstärkt wurde diese Tendenz nicht zuletzt durch die traumatisierende Wirkung, die der Yom Kippur-Krieg im Oktober 1973 auslöste. Damals stand Israel in den ersten Kriegstagen am Rande einer entscheidenden Niederlage als Folge des überraschenden Angriffs der ägyptischen Truppen auf die israelischen Stellungen am Ostufer des Suezkanals. Für diese existenzbedrohende Situation wurde weithin die damalige israelische Regierung unter Ministerpräsidentin *Golda Meir* verantwortlich gemacht, weil sie es im Vorfeld des Kriegeausbruchs an der gebotenen Wachsamkeit habe fehlen lassen. Die mit dem Regierungsantritt *Begins* 1977 sichtbar gewordene Verschiebung im politischen Spektrum Israels verfestigte sich in seiner Regierungszeit (1977–1983) und danach unter den Ministerpräsidenten von *Jitzchak Shamir* (1983/84 und 1986–1992), *Benjamin Netanjahu* (1996–1999) und *Ariel Sharon* (2001–2005). Die auch zeitlich jeweils kurzen Regierungsperioden von *Shimon Peres* (1984–1986, 1995/1996), *Jitzchak Rabin* (1992–1995) – in seine Zeit fielen die Oslo-Abkommen – und *Ehud Barak* (1999–2001) konnte den Lauf dieser Grundströmung der israelischen politischen Landschaft nicht aufhalten oder auch nur nachhaltig ändern. Im historischen Verlauf muten diese kurzzeitigen Regierungsintervalle unter (links-)liberaler Führung wie Episoden an.

Eine weitere, ganz entscheidende Verstärkung des „rechten Lagers“ vollzog sich mit dem zweiten Regierungsantritt *Benjamin Netanjahus* im Jahre 2009. In den darauffolgenden Jahren haben sich massive Verwerfungen innerhalb des politischen und gesellschaftlichen Koordinatensystems Israels gezeigt:

- Das überkommene Parteienspektrum ist zerfallen. Das deutlichste äußere Zeichen dafür ist der Niedergang der Arbeitspartei, abzulesen an dem Absinken des Stimmenanteils von ca. 15% (2006) auf ca. 9,9% (2009). Ob der Wiederanstieg auf ca. 11,4% bei den Parlamentswahlen 2013 einen nachhaltigen Trend andeutet, ist sehr zu bezweifeln. Personen- (z.B. *Jair Lapid*: Jesch Atid) und herkunftsbezogene (z.B. Israel Beiteinu als Partei der russischen Einwanderer) Partieneugründungen haben die früheren programmatisch-integrativen Parteienblöcke sowohl des rechten als auch des liberalen linken Lagers abgelöst;
- Die teils offene, teils verdeckte Siedlungstätigkeit in den besetzten Gebieten (Westbank) hat sich deutlich verstärkt;
- Das Rechtsstaatlichkeitsbewußtsein hat sich spürbar abgeschwächt. Dies drückt sich in dem Entstehen rechtsfreier Räume in den Siedlungsgebieten und der abnehmenden Achtung gegenüber der rechtsprechenden Gewalt (Nichtbeachtung von Urteilen des Obersten Gerichts sogar seitens der Regierung);¹⁴

¹⁴ Dies bezieht sich insbesondere auf Entscheidungen über die Räumung illegaler Siedlungsaußenposten.

– Bei einer insgesamt positiven Bilanz der israelischen Wirtschaftspolitik zur Bekämpfung der Folgen der Weltfinanzkrise hat sich die soziale Spaltung als Folge der neo-liberalen ökonomischen Ausrichtung der rechten Regierungspolitik deutlich verschärft. Daraus entwickelte sich die soziale Protestbewegung, deren Ausgangspunkt und Zentrum 2011 der Rothschild Boulevard in Tel Aviv war;

– Innerhalb des religiösen Establishments ist eine deutliche Verhärtung der Orthodoxie (Oberrabbinat) festzustellen, die verstärkt unter den Druck der zahlenmäßig zunehmenden Ultraorthodoxie gerät. Gleichzeitig gibt es Tendenzen einer Unterwanderung säkularer Institutionen durch nationalistisch-(ultra-)orthodoxe Eiferer, insbesondere der Streitkräfte (Zahal), die traditionell große Bedeutung als säkularer Ordnungs- und Integrationsfaktor haben und in der Vergangenheit als Kaderschmiede für die politische Führungselite fungierten (u.a. *Jitzchak Rabin*, *Ehud Barak*). Auch das Erziehungswesen steuert einen religiös-orthodoxen Kurs, so etwa mit der Entscheidung des Erziehungsministeriums, geschlechtergetrennten Schulunterricht finanziell zu unterstützen und Schulbücher in Fragen der Biologie zu zensieren.¹⁵

Auch die Parlamentswahlen vom Januar 2013 haben entgegen den Hoffnungen liberaler Kreise an der Dominanz des rechten Lagers nichts Wesentliches geändert.

Das bei der Wahl als einheitliche Liste aufgetretene vorherige Regierungslager (Likud-Partei und die Israel Beiteinu-Partei der rechtsgerichteten russischen Einwanderer) hat zwar Stimmanteile verloren. Dafür ist jedoch die radikale Siedlerpartei Habayit Hajehudi mit einem hohen Stimmenzuwachs in die Knesset und die Regierungskoalition eingezogen. Die von *Netanjahu* ebenfalls in die Regierung aufgenommenen gemäßigten Parteien haben bislang keine erkennbare Abschwächung des rechten Kurses insbesondere in der Siedlungsfrage herbeigeführt.

Damit ist auch in näherer Zukunft nicht zu rechnen: Zum einen ist die Position *Netanjahus* innerhalb des Likud bei den Parteiwahlen des Jahres 2013 zugunsten weiter rechts stehender Politiker deutlich geschwächt worden. Zum anderen hat das rechte Lager durch die Wiederernennung *Avigdor Liebermans* (Chef der Israel Beiteinu-Gruppe) zum Außenminister nach seinem Freispruch in einem Bestechungsverfahren Auftrieb erhalten. Eine gewisse Liberalisierung erscheint dagegen innenpolitisch im Bereich der Beziehungen zwischen Staat und Religion, z.B. bei Fragen des Ehe- und Familienrechts, vorstellbar. Die (ultra-)orthodoxen Fraktionen sind nicht mehr in der Regierungskoalition vertreten und die rechten Regierungsparteien, insbesondere die Israel-Beiteinu-Partei, sind ganz überwiegend laizistisch eingestellt.

¹⁵ Vgl. FAZ v. 31.10.2013, S. 27 („Geschlechtertrennung und Schulbuchzensur“).

Insgesamt führt die andauernde Dominanz der politischen Agenda des „rechten Lagers“ nicht nur zu einer Entliberalisierung des innenpolitischen Klimas in Israel, sondern auch zu außenpolitischer Isolierung. Insbesondere im Zusammenhang mit der Behandlung der arabischen Bevölkerung gerät das Land zunehmend in den Ruf eines Apartheid-Staates. Einzelne Boykott- und Sanktionsmaßnahmen z.B. auch seitens der EU¹⁶ behindern zunehmend den internationalen Aktionsradius Israels.

Mit dem Aufstieg des „rechten Lagers“ seit den 70er/80er Jahren ging ein politisch-gesellschaftlicher Sichtbarkeitsverlust des laizistisch-linksliberalen Lagers einher. Dessen Erscheinungskraft reduzierte und konzentrierte sich mehr und mehr auf den gesellschaftlich-kulturellen Bereich. Eines der frühen und deutlich wahrnehmbaren Äußerungsfelder war die geschichtswissenschaftliche Aufarbeitung des Zionismus. Nach und nach nahmen sich einzelne jüngere Historiker einige der Gründungsmythen Israels vor und stellten der herkömmlichen und z.T. auch politisch instrumentalisierten Sichtweise neuartige Narrative entgegen. So ging es z.B. *Ilan Pappé*¹⁷ um die Enttarnung des Mythos, im Verlaufe des Unabhängigkeitskrieges 1948/49 seien die Bewohner der von den israelischen Truppen eingenommenen arabischen Dörfer freiwillig geflohen. Demgegenüber stellt er einen Geschehensablauf dar, bei dem hinter diesen Vorgängen eine gezielte Vertreibungsstrategie seitens der israelischen militärischen und zivilen Befehlshaber stand. Ein anderer Gründungsmythos ist die Vorstellung, bei den jüdischen Bevölkerungsschwerpunkten in Europa und Amerika handle es sich um eine abstammungsmäßig weitgehend homogene Volksgemeinschaft, die in direkter Nachkommenschaft zum antiken Volk der Juden stehe. Dem wird von *Shlomo Sand*¹⁸ die These entgegengesetzt, bei den Juden der Moderne habe man es mit einer Bevölkerungsgruppe zu tun, die herkunftsmäßig überwiegend durch fremde, im Laufe der Zeit zum Judentum übergetretene Volksstämme konstituiert werde.

In neuerer Zeit sind auch aus den Reihen der politischen Klasse kritische Stimmen zur Entwicklung Israels zu vernehmen. Dabei spielt zunehmend auch die Instrumentalisierung des Holocaust für politische Zwecke der nationalistischen Kreise und für die Abwehr von Kritik an dieser Entwicklung eine Rolle. Besonders Aufsehen haben hier die Gedanken erregt, die der frühere Knesset-Sprecher *Avraham Burg* in seinem Buch „Hitler besiegen“ mit dem Untertitel „Warum Israel sich endlich vom Holocaust lösen muß“¹⁹ vorgetragen hat. Darin äußert er

¹⁶ So hat die EU-Kommission im Juli 2013 beschlossen, zukünftig die Förderung von Forschungsprojekten zu untersagen, bei denen israelische Einrichtungen oder Individuen aus den nach internationalem Recht illegalen jüdischen Siedlungen in den besetzten Gebieten begünstigt würden.

¹⁷ Die ethnische Säuberung Palästinas, Zweitausendundeins-Verlag, 6. Aufl. 2009.

¹⁸ Die Erfindung des jüdischen Volkes – Israels Gründungsmythos auf dem Prüfstand, Propyläen-Verlag, 4. Aufl. 2010.

¹⁹ Campus-Verlag 2009.

scharfe Kritik an nationalistischen und rassistischen Tendenzen, die er im neueren israelischen politischen Mainstream am Werke sieht. Besondere Breitenwirkung erzielen verständlicherweise kritische Stellungnahmen zu Politik und Gesellschaft Israels aus dem schriftstellerischen Bereich. Hierfür stehen insbesondere die Namen *Amos Oz* und *David Grossman*, dessen Sohn im August 2006 während des 2. Libanon-Krieges getötet wurde.²⁰

Diese Spannungsgeladenheit des politisch-gesellschaftlichen Klimas ist denn wohl auch dafür verantwortlich, daß – wie wohl in keinem anderen Land – die intellektuelle Klasse Israels in einem permanenten Prozeß des Soul-Searching begriffen ist. Sichtbar wird dies ganz besonders in den Spalten der linksliberalen Tageszeitung „Haaretz“.

IV. Die Entwicklung des US-amerikanischen Judentums

Es liegt angesichts der zahlenmäßigen Stärke und der Bedeutung der jüdischen Gemeinschaft in den USA auf der Hand, daß die Entwicklung der politischen und gesellschaftlichen Verhältnisse in Israel in enger Wechselwirkung zu den Verhältnissen in den USA steht. Diese Wechselwirkung erfaßt sowohl die allgemeine politisch-gesellschaftliche Atmosphäre als auch innerjüdische Konfliktlinien.

Zunächst haben sich die weltpolitische Stellung und die innenpolitische Verfassung der USA wie auch die amerikanische Gesellschaft in einer Weise verändert, die das Verhältnis zum Staat Israel und zum Judentum nicht unberührt gelassen hat. Lange Zeit waren die USA eine Art Schutzmacht Israels, das nicht selten als der 51. Staat der USA angesehen wurde. Dies änderte sich zu Beginn der 70er Jahre, als der Nahost-Konflikt sich von einem regionalen Territorial- und Souveränitätsstreit zunächst zu einer weltpolitisch-ökonomischen Machtprobe (Ölkrise) entwickelte. Mit der Zunahme des internationalen Terrorismus wurde der Nahost-Konflikt dann zu einem prototypischen Bestandteil der Auseinandersetzung zwischen „dem Westen“ und „dem Islam“. Die Ereignisse des 11. September 2001 und ihre traumatisierenden Folgen und die in diesen Gesamtzusammenhang einzuordnenden militärischen Verwicklungen (Afghanistan, Irak) haben für die USA neue Sensibilitäten und Rücksichtnahmefelder eröffnet, die einer bedingungslosen Parteinahme zugunsten Israels entgegenstehen. Insbesondere seit dem Regierungsantritt der *Obama*-Administration in den USA und der *Netanjahu*-Regierung in Israel im Jahre 2009 sind die Beziehungen zwischen

²⁰ Die Todesnachricht erreichte *Grossman* zu einer Zeit, als er an dem Roman „Eine Frau flieht vor einer Nachricht“ schrieb, der das Schicksal einer Mutter beschreibt, die sich aus Angst vor der befürchteten Überbringung einer Todesnachricht über ihren im Kriegeinsatz befindlichen Sohn auf eine Wanderung begibt.

Washington und Jerusalem durch einen permanenten Spannungszustand über den Nahost-Konflikt und insbesondere die israelische Siedlungspolitik in den besetzten Gebieten gekennzeichnet. Einen vorläufigen (?) Höhepunkt haben diese Spannungen Ende November 2013 mit dem Interimsabkommen zwischen den 5+1 Staaten und dem Iran über die Nutzung der Kernenergie durch den Iran erreicht. Ministerpräsident *Netanjahu* hat dieses Abkommen als „historischen Fehler“ bezeichnet. Eine langfristige Interessendivergenz zwischen den USA und Israel könnte sich aus einer Veränderung der amerikanischen Interessenlage hinsichtlich der nahöstlichen Region ergeben. Dank der neuen Öl- und Gasgewinnungstechniken (Schiefergasgewinnung) werden die USA voraussichtlich in einigen Jahren zum Energieexportland werden. Dies könnte eine geostrategische Abwendung Amerikas von der nahöstlichen Region bewirken.

Die sich schon seit längerem abzeichnende Veränderung der weltpolitischen und geostrategischen Umfeldbedingungen hat schon bisher ihre Spuren in der innenpolitischen Landschaft der USA hinterlassen. Sie ist nicht ohne Einfluß auf das Verhältnis zu Israel geblieben. Seit längerem ist in den USA eine Erosion der politischen Mitte zu beobachten. Die Ränder des parteipolitischen Spektrums verstärken sich. Dies gilt besonders für das rechte Lager der Republikaner. Während allerdings normalerweise die politische Richtungsbeschreibung „rechts“ in der jüdischen Bevölkerung gewisse innere Vorbehalte aktiviert, ist es in den USA anders. Die christlichen Fundamentalisten in der Republikanischen Partei gehören heute zu den treuesten Unterstützern Israels. Ungeachtet der nach wie vor mehrheitlichen (60–70%) jüdischen Wahlpräferenz für die Demokratische Partei ist durchaus auch eine einflußreiche jüdische Unterstützung für die Republikanische Partei zu registrieren.²¹ Besonders sichtbar ist hier die Person *Sheldon Adelsons*, des multi-milliardenschweren Casino-Moguls geworden, der große Summen für republikanische Präsidentschaftskandidaten in den USA – vor den Wahlen 2012 zunächst Newt Gingrich, danach Mitt Romney – gespendet hat. Noch im November 2013 machte *Adelson* allen Ernstes den Vorschlag, die USA sollten eine Atom-bombe auf ein abgelegenes Gebiet im Iran abwerfen, um das dortige Regime zu disziplinieren.²² Auch leistet er große Spendensummen für expansive Projekte der rechten Regierungsmehrheit in Israel und engagiert sich als Financier für dortige *Netanjahu*-treue Presseorgane, allen voran die auflagenstarke Tageszeitung *Israel Hayom*. Andere Vertreter des rechten Lagers wie z.B. *Arthur Finkelstein* betätigen sich als Propagandahelfer und Spin-Doktoren für konservative amerikanische

²¹ Unter den der Orthodoxie zugehörigen amerikanischen Juden gibt es eine mehrheitliche Anhängerschaft zugunsten der Republikanischen Partei. Zu den intellektuellen Speerspitzen des Neo-Konservatismus in den USA gehört seit langem die von neo-konservativ-republikanisch orientierten jüdischen Intellektuellen herausgegebene Zeitschrift „Commentary“.

²² Vgl. Haaretz-online vom 24.10.2013.

und israelische Politiker. Dies zeigt auch, daß es eine gewisse Wechselwirkung zwischen der Verschiebung der politischen Achse nach rechts in Israel und der ideologischen Rechtsorientierung der Republikaner in Amerika gibt.

Israel und die USA stellen die beiden *Zentren des Judentums* mit jeweils 6–7 Mio. Menschen dar, hinter denen die übrige Welt (Europa, Commonwealth-Staaten und Lateinamerika) zahlenmäßig weit zurückbleibt. Die beiden Zentren füllen auch das religiöse Spektrum des Judentums aus. Sie sind allerdings sehr unterschiedliche Wege gegangen. Auf der einen Seite (Israel) finden wir die religiöse Monopolstellung der Orthodoxie, auf der anderen Seite (USA) eine Pluralität von „Judentümern“ mit den Hauptgruppen der Orthodoxie und der nicht-orthodoxen Zwei-Drittel-Mehrheit vor allem aus konservativen und Reform-Juden. Während die Orthodoxie von der Unabänderlichkeit der von Gott gegebenen antiken Religionsgesetze (Halacha) ausgeht, treten die nicht-orthodoxen Strömungen mit Abstufungen für deren Wandelbarkeit ein. Es stehen sich buchstabenstrenge rabbinische Auslegung und die Aufklärung mit ihrer Ethik der Verantwortung des Individuums als Mittelpunkt gegenüber – die nicht-orthodoxen Richtungen gehen auf die durch die Aufklärung (*Moses Mendelssohn*) beseelte deutsche Reformbewegung des 19. Jahrhunderts zurück.²³ Dabei ist nicht zu übersehen, daß die Orthodoxie in Israel einem gewissen bevölkerungspolitischen Druck seitens des in sich wiederum stark zerklüfteten Kosmos der Ultra-Orthodoxie ausgesetzt ist. Die Ultra-Orthodoxie (hebr.: Haredim) rekrutiert sich im wesentlichen aus religiösen Gruppierungen und Anhängerschaften, die von einem Rabbiner geführt werden. Der ganz überwiegende Teil dieser Gemeinschaften geht oft in dynastischer Weise auf aschkenasische, d.h. aus Osteuropa stammende religiöse Oberhäupter zurück. Eines der Kennzeichen dieser Gruppierungen ist ihre ungewöhnliche Geburtenstärke. So hinterließ das im Jahre 2012 verstorbene Oberhaupt der litauischen Ultra-Orthodoxie, Rabbi Elyashiv, bei seinem Tode etwa 1000 (!) Abkömmlinge. Bemühungen um einen Ausgleich der z.T. scharfen religiösen Gegensätze – etwa im Sinne einer innerjüdischen „ökumenischen Bewegung“ – gibt es nicht. Für längere Zeit nach dem 2. Weltkrieg wurden diese Gegensätze nach außen durch zwei Faktoren überdeckt: die gemeinsame Traumatisierung aller Strömungen durch den Holocaust und das – von vereinzelten Ausnahmen im Bereich der Ultra-Orthodoxie abgesehen –²⁴ ebenfalls gemeinsame Eintreten für das Lebensrecht und die Interessen Israels. Diese Traumatisierung hat sich in der

²³ Dazu näher: Kühne, „Moses Mendelssohn, die Aufklärung und das moderne Judentum“, in: BWG, Abhandlungen, Bd. LIX (2008), S. 231 ff., und „Israel Jacobson und das Refomjudentum“, BWG, Abhandlungen, Bd. LXIII (2011), S. 151 ff.

²⁴ Vom extremen Rand der Ultra-Orthodoxie wird die Gründung des Staates Israel als jüdische Heimstätte in Erez Israel als Gotteslästerung angesehen, da die Rückführung des jüdischen Volkes erst mit der Ankunft des Messias einsetzen dürfe.

neueren Vergangenheit schon aus biologischen Gründen abgeschwächt. Vielmehr ist sie zu einer monumentalisierenden Gedenkkultur (Holocaust-Museen) mutiert und gleichzeitig sublimiert.

Dagegen hat sich die *politisch-gesellschaftliche Entwicklung Israels* in der jüngeren Vergangenheit von einem einigenden Band zu einem *Spaltfaktor* sowohl innerhalb der israelischen Gesellschaft als auch im Verhältnis zwischen Israel und dem amerikanischen Judentum und schließlich innerhalb des amerikanischen Judentums selbst entwickelt. Diese Beziehungsgeflechte sind allerdings eng miteinander verwoben. Im Grunde geht es um den Dualismus zwischen Separatismus und Universalismus, der jüdische Existenz von allem Anfang an geprägt hat.

Besonders eng sind die Verbindungen zwischen der israelischen und der amerikanischen Orthodoxie, wobei dieser Begriff nicht so sehr die Ultra-Orthodoxie, sondern die sog. moderne Orthodoxie (gleichermaßen religiös wie weltlich) mit ungefähr drei Viertel der Gesamt-Orthodoxie bezeichnet. Diese Strömung hat in der jüngeren Vergangenheit stark an Vitalität gewonnen. Ein wesentlicher Grund liegt in dem separaten Erziehungssystem. Ein hoher Prozentsatz der Kinder aus orthodoxen Familien besucht orthodoxe Privatschulen, in denen Israel einen zentralen Bezugspunkt bildet.²⁵ Insgesamt wird hier eine israelisch-jüdische Weltsicht vermittelt, die zu einer hohen Identifikation mit Israel und seiner Bedeutung für die jüdische Sache führt. Die religiöse Aufladung des Kampfes um die Westbank und die tendenziell angewachsene intolerante Haltung der israelischen Orthodoxie einschließlich führender Vertreter des Oberrabbinats – eine gewisse „Ayatollisierung“ insbesondere auf der sephardischen Seite ist insoweit nicht zu verkennen – haben eine zunehmend illiberale Weltanschauung hervorgebracht, die sich zuweilen bis zu Verunglimpfungen nicht-orthodoxer Religionspraktiken steigern. Unter dem Einfluß des israelischen/amerikanischen orthodoxen rabbinischen Establishments hat sich diese „moderne amerikanische Orthodoxie“ mehr und mehr zum Rückgrat der pro-Israel Lobbygruppen, insbesondere von AIPAC (American Israel Public Affairs Committee) entwickelt. Die hier gepflegte Weltsicht hat – nicht verwunderlich – auch die Sensibilität gegenüber den rechtsstaatlich-demokratisch bedenklichen Tendenzen sowohl im Verhältnis Israels zu den Palästinensern als auch innerhalb der israelisch-jüdischen Gesellschaft herabgesetzt.

Genau hier unterscheiden sich die nicht-orthodoxen, also vor allem die konservativen und die reformorientierten Strömungen von der Orthodoxie. Ihr Verhältnis zu Israel ist deutlich komplexer und komplizierter. Auch ist der Gedanke des Zionismus im US-Judentum erst unter dem Eindruck des Holocaust voll akzeptiert worden. Die heutige kritische Haltung dieser nicht-orthodoxen Strömungen ergibt

²⁵ Dazu Beinart (Fn. 5), S. 189 ff.

sich schon aus den regelmäßig wieder aufbrechenden religiösen Konflikten – z.B. Nichtanerkennung nicht-orthodoxer Konversionen in Israel, die reform-rabbinische Mitwirkung bei gemischt-religiösen Eheschließungen und insbesondere die nur von der Reform zugelassene Patrilinealität (väterliche Abstammung) als Kriterium für die Zugehörigkeit zum Judentum. Für das orthodoxe Establishment in den USA und insbesondere auch in Israel handelt es sich denn auch bei einem nicht unerheblichen Teil der sog. Reformjuden gar nicht um Juden.²⁶

Ungeachtet – vielleicht auch gerade wegen – der bei konservativen und reformorientierten Juden weit vorangeschrittenen Assimilation müssen sich diese Kreise mit zunehmendem Desinteresse ihrer Mitglieder am Gemeindeleben auseinandersetzen. Reformsynagogen sind nicht selten zu den normalen Gottesdienstzeiten fast leer, wie der Verfasser zu seiner Überraschung immer wieder beim Besuch des Temple Emanu-El, der größten Synagoge der Welt an der Upper East Side Manhattans gegenüber dem New Yorker Central Park, feststellen konnte. Assimilierten amerikanischen Juden stehen bei der Suche nach beruflichem Erfolg und nach Teilnahme am Leben der allgemeinen Gesellschaft keine nennenswerten Hindernisse mehr im Wege. Auf der anderen Seite sind konservative und Reform-Juden aufgrund noch nachwirkender historischer Tradition mit einem besonderen Sensorium gegenüber illiberalen und undemokratischen Tendenzen ausgestattet. Diese weltanschauliche Konstellation wie auch ihre jüdische und zugleich amerikanische Wertgebundenheit läßt sie mit besonderer Feinfühligkeit auf illiberale Tendenzen der politischen und gesellschaftlichen Entwicklung in Israel reagieren. Angesichts der schwindenden Anziehungskraft der vielfach als ritualisiert-abgehoben-vergangenheitsbezogen (Holocaust) und erstarrt empfundenen Gemeinde- und Glaubenspraxis der nicht-orthodoxen Strömungen wenden sich viele, insbesondere liberale Juden der jüngeren Generation, sog. social action groups zu. Bei ihnen haben sie den Eindruck, daß ethische Wertvorstellungen sehr viel unmittelbarer in die Förderung praktischer gesellschaftlicher Anliegen, z.B. im Umweltbereich, umgesetzt werden. Dies ist der sozialpsychologische Hintergrund der sich mittlerweile deutlich vernehmbar artikulierenden Kritik an der *Netanjahu*-Regierung und – allgemeiner – am „rechten Lager“ in Israel. Veranstaltungen mit Vertretern dieser Richtung an amerikanischen Universitäten werden häufig gestört. Die vom liberalen Mainstream des amerikanischen Judentums ausgehende Kritik hat im Jahre 2008 auch zur Gründung von JStreet als Konkurrenzorganisation zu AIPAC geführt.²⁷ Sie setzt sich vor allem für eine Zwei-Staaten-Lösung unter Verzicht auf die Siedlungspolitik ein. Die Speerspitze dieser Kritik bilden Intellektuelle wie z.B. *David Remnick* (Pulitzer-Preisträger),

²⁶ So noch jüngst der einflußreiche Knesset-(Likud-)Abgeordnete *David Rotem*: Das Reformjudentum sei „eine andere Religion“, vgl. Haaretz-online vom 05.02.2014.

²⁷ In Europa verfolgt die Organisation JCall ähnliche Ziele.

Peter Beinart (Journalist und Politikwissenschaftler), *Norman Finkelstein* (Politikwissenschaftler) oder – mit gelegentlichen Stellungnahmen – *Paul Krugman* (Wirtschafts-Nobelpreisträger),²⁸ der in der israelischen Politik eine „schrittweise, langfristige Form des Selbstmords“ sieht.

Diese Stimmen bilden nur die Spitze des Eisbergs der zunehmenden Entfremdung zwischen dem liberalen Mainstream des amerikanischen Judentums und den herrschenden politischen und gesellschaftlichen Verhältnissen in Israel, die keineswegs nur eine momentane, durch Wahlen korrigierbare Abirrung darzustellen scheinen.²⁹

Bei den wachsenden inneren, durch verbliebene Gruppenrücksichtnahmen allerdings nicht so sichtbaren Vorbehalten der jüdischen Bevölkerungsmehrheit verbinden sich traditionelle ethische Wertmaßstäbe des Judentums mit den freiheits- und selbstverwirklichungsgerichteten Bestrebungen des amerikanischen politischen und gesellschaftlichen Systems. Diese Entfremdung wird in der heutigen Zeit auch nicht mehr durch nennenswerte antijüdische Vorbehalte der nicht-jüdischen Mehrheitsgesellschaft aufgehalten. Hierbei spielt auch eine Rolle, daß die Struktur dieser Mehrheitsgesellschaft in neuerer Zeit starken Veränderungen unterworfen ist: Man denke nur an die rasante Zunahme der Latino-Bevölkerung und an die mit starker gesellschaftlicher Aufstiegsdynamik verbundene Einwanderung aus asiatischen Ländern (Vietnam, China, Korea). Dadurch hat sich der wahrnehmbare Abstand zwischen den jüdisch-liberalen Amerikanern und der traditionell führenden und von antijüdischen Vorbehalten keineswegs freien WASP (White Anglo-Saxon Protestant)-Schicht deutlich relativiert. Aus dieser Perspektive erscheint die Addition beider Gruppen fast als einheitliches Bevölkerungssegment – eine Verschiebung, die das Entstehen christlich-jüdischer Allianzen im politischen und gesellschaftlichen Leben der USA ebenfalls gefördert haben dürfte.

Die danach ohnehin bereits sehr zerklüftete Landschaft des US-amerikanischen Judentums ist im Oktober 2013 durch die Veröffentlichung der Ergebnisse einer umfassenden Studie erschüttert worden, die das Pew Research Center³⁰ über die Situation der amerikanischen Juden erarbeitet hat (die sog. *Pew-Studie*). Die Botschaft ist überwiegend als verstörend und als Alarmsignal verstanden worden. Während mit 6,7 Mio. die Zahl der amerikanischen Juden gestiegen ist, ist der prozentuale Anteil der jüdischen Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung – wohl wegen der niedrigen Geburtenrate innerhalb der nicht-orthodoxen jüdischen Bevölkerung – zurückgegangen. Ein markantes Ergebnis ist die stark abnehmende

²⁸ New York Times, 24.4.2012 („Conscience of a Liberal“).

²⁹ Vereinzelt gibt es allerdings auch unter den eher liberalen US-amerikanischen Juden Anhänger der israelischen Politik gegenüber den Palästinensern, z.B. der Harvard-(Jura-)Professor *Alan Dershowitz*.

³⁰ Das Pew Research Center ist ein in Washington, D.C., angesiedeltes Meinungsforschungsinstitut.

Bedeutung der Religion als Identifikationsmerkmal der jüdischen Bevölkerung: Während im Jahre 2003 93% der befragten Juden „jüdisch“ als Religionsbekenntnis angaben, sind es im Jahre 2013 nur noch 78%. Dementsprechend nimmt der Anteil der Juden ab, die einer jüdischen Gemeinde angehören. Besonders betroffen von diesem Schwund sind die konservativen Gemeinden, denen einerseits die Bindungskraft der Orthodoxie fehlt, die aber andererseits – im Unterschied zur Reform – keine aktive Politik zur Einbeziehung nicht-jüdischer Ehegatten und Familienmitglieder in das Gemeindeleben (Outreach-Politik) betreiben.

Gerade eine solche „Outreach“-Gemeindepolitik wäre wohl angesichts des ebenfalls aus der *Pew-Studie* ersichtlichen starken Anstiegs der Mischehen geboten: Während bei den vor 1970 von Juden eingegangenen Ehen um 17% einen nicht-jüdischen Partner aufwiesen, ist dieser Anteil bei den im Jahre 2000 und danach erfolgten Eheschließungen auf 58% gestiegen.

Schließlich zeigt die *Pew-Studie*, daß sich zwar die klare Mehrheit (ca. 70%) der amerikanischen Juden als mit Israel in irgendeiner Weise verbunden und an seinem Schicksal interessiert zeigt. Gleichzeitig bestätigt sie aber die in der jüngsten literarischen Kritik geäußerten mehr oder weniger deutlichen Vorbehalte eines bedeutenden Teils der amerikanischen Judenheit gegenüber der Politik der *Netanjahu*-Regierung im Nahost-Konflikt und insbesondere der israelischen Siedlungspolitik in der Westbank. Insgesamt weisen damit die kritischen Stimmen zum Verhältnis Israel – US-Judentum und zur innerjüdischen Situation in den USA in dieselbe Richtung.

V. Zerreißprobe oder neue Fundamente ?

Die Auseinandersetzungen um die von Israel in seinem Konflikt mit der palästinensisch-arabischen Welt einzuschlagende Politik und um seine innere gesellschaftliche Struktur einerseits und die nunmehr durch neueste Statistiken unterfütterte Entwicklung des US-amerikanischen Judentums andererseits legen die Perspektive einer bevorstehenden Zerreißprobe für die jüdische Weltgemeinschaft nahe. In früheren Zeiten und über weite Strecken der jüdischen Geschichte waren es vor allem antisemitische Einstellungen, welche das Judentum und seine Entwicklung wie auch Erscheinungsformen mit Kritik überzogen. Heute sind es vermehrt auch liberale jüdische Kreise und Persönlichkeiten, die lautstark deutliche Kritik an Erscheinungen und Tendenzen im „rechten“ Lager der Politik und Gesellschaft Israels sowie dessen Unterstützungskohorten im überwiegenden Teil des orthodoxen amerikanischen Judentums üben.

Israel steht ohne Zweifel weiterhin vor externen Herausforderungen im Kampf um seine Existenz in gesicherten Grenzen (Iran). Daneben geht es aber auch um die Bewahrung seines rechtsstaatlich-demokratischen Charakters und seiner welt-offenen, liberalen gesellschaftlichen Strukturen. Hier hat sich vor allem durch die

jahrzehntelange Position des Landes als Besatzungsmacht ein besorgniserregendes Gefährdungspotential herausgebildet. Dies deutlich und substantiiert dargelegt zu haben, ist das Verdienst der zahlreichen literarischen Zeugnisse der letzten Zeit.

Das Gefährdungspotential hat auch eine nicht zu übersehende *religiöse Komponente*. Dies wirft die Frage nach der Substanz und der endzeitlichen Bestimmung des Judentums aus. Derzeit streben die separatistischen, auf die Territorialität von Erez Israel fixierten Gruppen, wie sie sich insbesondere in der religiösen Siedlerbewegung manifestieren, und die universalistischen ethik-orientierten Richtungen, wie sie sich vornehmlich im Mainstream des liberalen US-amerikanischen Judentums herausgebildet haben, weit auseinander. Hier stellt sich die Frage, ob es (noch) eine Brücke zwischen diesen Richtungen gibt. Alle Strömungen des Judentums unterliegen dabei einer hohen Verantwortung. Das jüdische Volk hat unter großen Opfern das zweitausendjährige Exil überstanden. Es wäre eine Tragödie, wenn sein Zerfall bereits wenige Jahrzehnte nach Wiedererlangung der Staatlichkeit einsetzte.

Um eine solche Entwicklung zu verhindern, bedarf es intensiver Anstrengungen in zweifacher Richtung:

1. Zum einen der Stärkung des *Solidaritätsgefühls* zwischen allen wesentlichen Strömungen des Judentums innerhalb und außerhalb Israels in dem Bewußtsein, daß die Existenz des jüdischen Volkes in der Gegenwart und vorausschaubaren Zukunft auf zwei geographischen Schwerpunkten ruht: Israel *und* der Diaspora mit dem Zentrum Amerika. Diesem Ziel ist es denn auch höchst abträglich, wenn z.B. der bekannte israelische Schriftsteller *A.B. Yehoshua*³¹ vor einiger Zeit die in der Diaspora, insbesondere in den USA, lebenden Juden abwertend als „Teil-Juden“ (partial Jews) bezeichnet. Nicht minder unangebracht und sogar verwerflich ist es, wenn – wie kürzlich geschehen – israelische Regierungskreise Übersichten über Fragebögen verbreiten, in denen jüdische Kreise in den USA über ihre eventuellen Loyalitäten im Falle eines Konflikts zwischen den USA und Israel befragt werden. Die Aktion konnte erst durch eine Anordnung *Netanjahus* gestoppt werden.³²

Einen ganz wesentlichen Beitrag zur Stärkung des innerjüdischen Zusammenhalts würde es bedeuten, wenn die Entfaltungsmöglichkeiten der hauptsächlich in den USA beheimateten nicht-orthodoxen Strömungen des Judentums (Konservative und Reformjuden) in Israel selbst gestärkt würden. Die auch in Israel existierenden nicht-orthodoxen Gemeinden, die allerdings keine offiziellen Funktionen in persönlichen Status-Angelegenheiten (Heiraten etc.) wahrnehmen dürfen, verzeichnen seit einigen Jahren einen Zulauf von Mitgliedern. Erste schwache

³¹ Haaretz-online vom 18.3.2012.

³² Vgl. den Bericht von *Barak Ravid* in Haaretz-online vom 27.10.2013.

Zeichen eines Zuwachses an Einfluß und Sichtbarkeit im öffentlichen Leben sind erkennbar, so z.B. die Kompromißversuche hinsichtlich des Zutrittsrechts von Frauen zur Klagemauer in Jerusalem zum Zwecke der Abhaltung von Gottesdiensten (Bewegung „Women of the Wall“) oder die im Zusammenhang mit einem Verfahren vor dem Obersten Gericht vom Staat zugestandene Finanzierung nicht-orthodoxer (d.h. konservativer und der Reformbewegung zugehöriger) Rabbiner aus staatlichen Mitteln, mit der Anfang 2014 begonnen wurde.

2. Zum anderen sind als Mittel zur Erreichung dieses Zieles – Intensivierung des Solidaritätsgefühls – wesentlich verstärkte Bemühungen um die *Vermittlung* sowohl jüdischer als auch allgemeiner *Bildung* geboten. Geistige Erziehung ist vom Anbeginn der Geschichte an eine der Lebenslinien des jüdischen Volkes und ein ganz wesentliches identitätsstiftendes Element. In einer kürzlich erschienenen Monographie haben *Maristella Botticini* und *Zvi Eckstein*,³³ zwei Ökonomeprofessoren aus Mailand bzw. Tel Aviv, die These aufgestellt und begründet, daß der Gang der jüdischen Geschichte weniger durch antisemitische Verfolgungen als durch die überragende Rolle geprägt worden ist, welche das Judentum nach der Vertreibung aus Palästina der geistigen Erziehung zugewiesen hat und welche für das Vordringen der Diasporajuden in auf Bildung gegründeten Berufszweigen verantwortlich ist.

Wirft man einmal einen Seitenblick auf die *deutschen Verhältnisse*, so trifft daher die jüngste Initiative des Zentralrats der Juden in Deutschland zur Förderung der Bildung („Projekt Jüdische Bildung“) genau das Richtige. Am 31.1.2013 fand eine Auftaktveranstaltung des Zentralrats der Juden in Berlin zur Gründung einer „Jüdischen Akademie“ in Analogie zu den bestehenden Evangelischen und Katholischen Akademien statt. Im Rahmen dieser Aktivitäten bietet sich dann vielleicht die Gelegenheit, dem Grundanliegen der Neu-Orthodoxie des 19. Jahrhunderts (*Samson Raphael Hirsch*) von der „Thora im Derech Erez“ (Thora und weltliche Kultur) in modernisierter Form neue Gestalt zu geben. Hier tut sich ein weites Feld für die jüdische Gemeinschaft auf.

VI. Schlußbemerkung: Innerjüdischer „Clash of Civilizations“?

Zu Beginn der Ausführungen war von der fundamental-religiösen Fanatisierung und der zivilgesellschaftlich-zerrütteten Lage in den Israel umgebenden näheren und weiteren islamischen Nachbarstaaten die Rede. Man kann in der damit einhergehenden Konfrontation mit dem Westen die Vorboten oder schon den Auftakt

³³ *M. Botticini/Z. Eckstein*, The Chosen Few – How Education Shaped Jewish History, 70 – 1492, Princeton University Press, 2012.

zu dem „Zusammenstoß der Kulturen“ oder „Clash of Civilizations“ sehen, wie ihn vor etwa 20 Jahren der US-amerikanische Politikwissenschaftler *Samuel Huntington*³⁴ vorausgesagt und beschrieben hat. Bei allen Vorbehalten gegenüber einseitigen Geschichts- und Politikdeutungen hat diese Vorstellung jedenfalls als Teilinterpretation etwas für sich. Es scheint, daß sich seit einiger Zeit in einem sehr verkleinerten Maßstab ein solcher „Clash of Civilizations“ auch innerhalb des Judentums abspielt. Wesentlich mitverantwortlich dürfte hierfür die jeweils unterschiedliche *geokulturelle* Einbettung der beiden Teilzentren der jüdischen Weltbevölkerung sein – einerseits die zu machtpolitischer Selbstbehauptung inmitten einer von voraufklärerischen Irrationalismen geprägten Weltregion verdamnte orthodoxie-lastige israelische Hälfte – andererseits die westlich-amerikanische Hälfte, die einen wesentlichen Bestandteil der führenden westlichen Zivilisationsmacht bildet und in ihrem jüdisch-liberalen Mainstream durch die europäisch-deutsche Aufklärung imprägniert ist.

³⁴ The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order, New York 1996; deutsch: Kampf der Kulturen. Die Neugestaltung der Weltpolitik im 21. Jahrhundert, München 1998.

Mitteilungen

Veröffentlichungen

Im Berichtsjahr wurden veröffentlicht:

Jahrbuch 2012 der BWG mit 293 Seiten

D. Weßelhöft und O. Matuschek: 70 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft 1943–2013. – Braunschweig: Appelhaus. 134 Seiten

Geschäftliche Mitteilungen:

Am 31.12.2013 gehörten der BWG 151 ordentliche Mitglieder an, davon 81 unter 70 Jahren, sowie 72 korrespondierende Mitglieder. Die Zahl der Mitglieder unter 70 Jahren betrug in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften 32, in der Klasse für Ingenieurwissenschaften 31 und in der Klasse für Geisteswissenschaften 19. Von den ordentlichen Mitgliedern zählten zum Bereich Braunschweig 86, zum Bereich Clausthal 15, zum Bereich Göttingen 7, zum Bereich Hannover 40, zum Bereich Hildesheim 1 und zum Bereich Osnabrück 2.

Das Plenum trat am 13.12.2013 zu seiner jährlichen Hauptsitzung zusammen, nahm die Jahresberichte des Präsidenten und der Vizepräsidenten entgegen und beschloss den Haushalt 2014. Herr Prof. Dr. Dietmar Brandes wurde für die Amtszeit 2014–2016 zum Präsidenten der BWG gewählt, Frau Prof. Dr. Christel Müller-Goymann wurde für die Amtsperiode 2014–2015 zur Vizepräsidentin gewählt. In den Wahlsitzungen am 12.04. und am 13.12.2013 wurden die auf der Seite 297 vorgestellten Mitglieder zugewählt. Herr Prof. Dr. Klaus Alpers wurde am 13.12.2013 als Vorsitzender der Klasse für Geisteswissenschaften für die Amtsperiode 2014–2016 wiedergewählt.

Das am 14.06.2013 tagende Konzil wählte den Gauß-Preisträger 2014 und legte die Feierliche Jahresversammlung auf den 09.05.2014 fest.

Todesfälle

- 03.05.2013 Günter Lautz (*15.11.23), Dr. rer. nat., Prof. für Elektrophysik, TU Braunschweig. Ordentliches Mitglied in der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1967.
- 05.07.2013 Paul Raabe (*21.02.27), Dr. phil. Dr. h. c. mult., Prof. für Deutsche Literaturwissenschaften, Direktor a.D. der Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel. Ordentliches Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1988.
- 26.07.2013 Christoph Scriba (*06.10.29), Dr. rer. nat., Prof. für Geschichte der Naturwissenschaften, Universität Hamburg. Korrespondierendes Mitglied in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1988.
- 30.08.2013 Eva Johanna Engel Holland (*18.08.1919), Dr. phil., Prof. für Germanistik und Romanistik, Wellesley College/USA und Forschungsauftrag DFG an der Herzog August Bibliothek, Wolfenbüttel. Korrespondierendes Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1999.
- 04.12.2013 Boeder, Heribert (*17.11.28), Dr. phil., Prof. für Philosophie, Universität Osnabrück. Korrespondierendes Mitglied in der Klasse für Geisteswissenschaften seit 2012, davor ordentliches Mitglied seit 1978. Vorsitzender der Klasse 1990–1991.

Nachrufe

Die Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik und die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft trauern um

GÜNTER LAUTZ

* 15. November 1923 † 3. Mai 2013

Professor Lautz wurde 1962 auf den Lehrstuhl für „Theoretische Elektrotechnik“ berufen und leitete ab 1963 bis zu seiner Emeritierung 1989 das aus dem Lehrstuhl hervorgegangene Institut für Elektrophysik. Herr Prof. Lautz hat auf seinem Arbeitsgebiet Elektrophysik verdienstvolle und nachhaltig wirkende Pionierarbeit geleistet, die im Grenzbereich zwischen Physik und Elektrotechnik mit wegbereitend für den späteren Aufbau der sehr erfolgreichen Halbleitertechnik an der Technischen Universität Braunschweig wirkte. So haben insbesondere die Forschungen an unkonventionellen Meßmethoden zur Bestimmung von Halbleiterparametern, über Anomalien dünner Schichten und Grenzflächen sowie elektrischer Schwankungserscheinungen die Ansiedlung und spätere Entwicklung der Halbleitertechnik hervorragend unterstützt.

In der Lehre widmete sich Herr Prof. Lautz wesentlich den klassischen Theorien elektromagnetischer Felder und physikalischer Werkstoffwissenschaften und vertrat diese anspruchsvollen Gebiete mit großem Engagement und geachteter hoher fachlicher und didaktischer Kompetenz. Seine Vorlesungen waren immer faszinierend präzise.

Herr Prof. Lautz hat sich neben seinem steten Engagement in Lehre und Forschung auch in die gesamtuniversitäre Pflicht nehmen lassen und war zunächst von 1965 bis 1967 Dekan der Fakultät für Maschinenwesen (der späteren gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik). Als Rektor der TU Braunschweig wirkte er in der Amtszeit von 1970 bis 1972 und begleitete unter anderem das 225. Gründungsjubiläum der Technischen Universität Braunschweig.

Nach seiner Emeritierung blieb er der TU Braunschweig, seinem Gebiet, der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft sowie der Akademie der Wissenschaften und der Literatur Mainz noch über viele Jahre verbunden.

Unser Mitgefühl gilt seiner Frau Gudrun Lautz und der Familie.

Wir werden sein Andenken bewahren.

Andreas Waag

EVA ENGEL-HOLLAND

* 18. August 1919 † 30. August 2013

Am 30. August 2013 starb in Göttingen Frau Prof. Dr. Eva Johanna Engel-Holland, geborene Engel, im Alter von 94 Jahren. Eva Engel hatte sich der Tradierung des Werkes von Moses Mendelssohn verschrieben und die letzten 25 Jahre ihres Lebens in Wolfenbüttel dieser Aufgabe gewidmet. Zuletzt hatte sie, bevor sie nach Göttingen umzog, in der Lessingstrasse 12 gewohnt, in der Nachbarschaft der Herzog August Bibliothek und auf jenem Grundstück, auf dem die in der Nacht vom 9. auf den 10. November 1938 niedergebrannte Synagoge stand. Seit 1988 hatte Eva Johanna Engel als Mitarbeiterin der Herzog August Bibliothek und finanziert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und anderen Mäzenen die Moses Mendelssohn Jubiläumsausgabe ihrem Abschluss näher gebracht. Diese mit ersten Ausgaben 1929 begonnene Edition war nach langer Unterbrechung erst Anfang der 1960er Jahre wieder aufgenommen worden. Am 6. September 1929 hatte man in zahlreichen jüdischen Gemeinden in Deutschland den Geburtstag des großen Aufklärers Moses Mendelssohn gefeiert. Der Höhepunkt dieser Feiern war die Vorstellung der ersten Bände der mit Unterstützung der Mendelssohn-Familie realisierten Moses-Mendelssohn-Jubiläumsausgabe. Den Vorsitz des für diese 1926 begonnene Ausgabe gebildeten Ehrenausschusses hatte kein geringerer als Adolf von Harnack, Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Im Geleitwort der ihr zum 75. Geburtstag am 18. August 1994 gewidmeten Ehrengabe, einer Sammlung ihrer kleineren Schriften, ist von diesen Anfängen der Jubiläumsausgabe die Rede. Dieser Sammlung hat Eva Johanna Engel selbst eine in der 1. Person verfasste Vita vorangestellt.¹ Darin schreibt sie: „Seit 1942 habe ich eine Leserkarte für die British Library, seit 1970 habe ich in Harvards Widener Bibliothek ein Pult im Magazin und in einem Bostoner Vorort als gebürtige Deutsche, als englische Staatsbürgerin, trotz allen Europäertums ein kleines Haus im Grünen, voller Bücher, Bilder und Erinnerungen an vierzehn erfüllte Ehejahre mit dem welterfahrenen Albert Holland, [...]. Ich betrachte es aber als Hauptaufgabe der ‚nächsten hundert Jahre‘, den Verdiensten und der Wirkung von Moses Mendelssohn, vor allem in Deutschland, den ihnen gebührenden Platz zu ermöglichen: ein Leben also in vier Welten, in denen das der Ideen das zuzugendste bleiben soll.“

Am 21. Dezember 1935 erhält die 1919 in Dortmund geborene Eva Johanna Engel von der „Westendschule. Oberlyzeum der Oberrealschulrichtung, Berlin-Charlottenburg“, der sie seit Ostern 1935 angehört hatte, ein „Abgangszeugnis“ mit der Bemerkung: „...verlässt die Anstalt, um mit ihren Eltern nach England

1 Eva J. Engel, „Gedanck und Empfindung“ – Ausgewählte Schriften. Stuttgart-Bad Cannstatt: frommann-holzboog 1994.

überzusiedeln.“ Nach dem Tod der Mutter Margarete Katarina, geb. Litten, im Jahre 1938 kümmert sich Eva Johanna Engel um den Haushalt und sorgt für den Vater und zwei jüngere Geschwister bis 1951. Der Bruder Carl Eduard war 1921, die Schwester Dorothea Valerie Magarete war 1926 geboren. Der Vater Stefan Engel, der britischer Staatsbürger wurde wie Eva Johanna Engel, die am 30. Juli 1947 die Staatsbürgerschaft erhielt, starb 1968. Ihren Lebensunterhalt bestritt Eva Johanna Engel durch ihre Tätigkeit als Deutsch- und Lateinlehrerin von 1941–1952. Seit 1967 war sie in den USA am Wellesley College Dozentin für Germanistik. Dort lernte sie ihren Ehemann, Albert Edward Holland, kennen, den sie am 23. Juni 1970 heiratete. Mit ihm, der am 17. August 1984 starb, lebte sie überwiegend in Boston in der 83 Leighton Rd., Wellesley, Ma.

Nach dem Tod von Alexander Altmann im Jahre 1987 übernahm Eva Johanna Engel-Holland die Weiterführung der Moses Mendelssohn Jubiläumsausgabe. Fortan stand diese Aufgabe für sie im Mittelpunkt. Zugleich begleitete Eva Johanna Engel weiterhin ihre Mitwelt mit wachem und kritischem Geist und mischte sich ein, wo es ihr geboten erschien. Diese Anteilnahme hatte auch eine verlässliche und wohltätige Seite, die sie im Stillen lebte und von der manche, die sie über Jahre begleitet und nicht selten auch materiell unterstützt hatte, nach ihrem Tod berichteten. Die Arbeit Eva Johanna Engels an der Moses Mendelssohn Jubiläumsausgabe wurde vielfach gewürdigt, so durch den Bundespräsidenten der Bundesrepublik Deutschland, Horst Köhler, in einem Grußschreiben, welches ihr bei einer Feier zu ihrem 90. Geburtstag am 18. August 2009 in einer öffentlichen Feierstunde in der Herzog August Bibliothek überreicht wurde. Am 30. August 1999 bereits war Eva Engel das Verdienstkreuz 1. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland aus der Hand des Regierungspräsidenten Dr. Axel Saipa überreicht worden, ein Jahr später wurde sie zum korrespondierenden Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft berufen. Den Abschluss der auf 42 Bände geplanten Moses Mendelssohn Jubiläumsausgabe hat Eva Johanna Engel nicht mehr erlebt.

Helwig Schmidt-Glintzer

PAUL RAABE

* 21. Februar 1927

† 5. Juli 2013

Am 5. Juli 2013 starb Paul Raabe im 87. Lebensjahr in Wolfenbüttel. Der am 21. Februar 1927 in Oldenburg Geborene gehörte zur „Flakgeneration“ mit Erinnerungen, nicht zuletzt an die Entdeckung des Lesens und der Literatur, die ihn ganz wesentlich prägten. Paul Raabe hat später von Wolfenbüttel aus die deutsche Bibliothekslandschaft der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wesentlich geprägt. Er sah sich als Anwalt der Bibliotheken und der kulturellen Überlieferungen in

Deutschland, und weil ihm die Bibliographie zu diesem Zwecke als wesentliches Element galt, betätigte er sich selbst auch immer wieder als Bibliograph, schon in seiner Hamburger Assistentenzeit als Mitarbeiter von Hans Pyritz bei der „Goethe-Bibliographie“. Sein Studienband „Einführung in die Bücherkunde zur deutschen Literaturwissenschaft“ wurde zum Bestseller. Ein weiteres Faszinosum für Raabe waren literarische Briefwechsel. Schon seine Dissertation befasste sich mit den Briefen Hölderlins. Von 1958 bis 1968 hatte er die Buchsammlung des Deutschen Literaturarchivs in Marbach geleitet, an deren Aufbau er insbesondere durch seine Erforschung des literarischen Expressionismus wesentlichen Anteil hat. 1968 folgte er dann auf dessen Wunsch Erhart Kästner als Direktor der Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel, die er bis 1992 zu einer weltweit ausstrahlenden Forschungsstätte für das Mittelalter und die Frühe Neuzeit ausbaute. In Wolfenbüttel, das ihn zum Ehrenbürger ernannte, engagierte sich Raabe für die Erhaltung der Altstadt und das kulturelle Leben in vielfältiger Weise. Unter dem Titel „Bibliosibirsk oder mitten in Deutschland – Jahre in Wolfenbüttel“ beschrieb er später seine Zeit in der Herzog August Bibliothek, die im 18. Jahrhundert als achtes Weltwunder bezeichnet wurde und die Paul Raabe im 20. Jahrhundert zur ersten Forschungsbibliothek in Deutschland ausbaute und die zum Vorbild für diesen neuen Typus einer außeruniversitären Forschungs- und Studienstätte wurde. Grundlage waren die kostbaren umfangreichen Bestände an Handschriften und alten Drucken. Zugute kam Paul Raabe die von Erhart Kästner mit dem Architekten Friedrich Wilhelm Kraemer eingeleitete spektakuläre Modernisierung und Verdichtung des wilhelminischen Bibliotheksgebäudes, welches unter dem Bibliotheksdirektor Otto von Heinemann (1824–1904) zusammen mit dem Direktorhaus 1887 eröffnet worden war.

Mit der Einrichtung eines Forschungsprogrammes, zunächst gefördert von der Volkswagenstiftung, wurde die Herzog August Bibliothek in den siebziger und achtziger Jahren zum deutschen Zentrum nicht nur für die Erforschung der europäischen Buch- und Druckgeschichte, sondern auch für die Erforschung des Mittelalters, der Renaissance und des Barock auf der Grundlage der literarischen Überlieferung. 1987 wurde Paul Raabe unter Würdigung seiner wissenschaftlichen Verdienste zum ordentlichen Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft berufen. Die so entstehenden und von Paul Raabe geförderten Netzwerke reichten in alle Welt und durchdrangen früh den sog. Eisernen Vorhang. Mit seinem Engagement für die Errichtung der Stiftung Weimarer Klassik nahm dieser in Marbach ebenso wie in Wolfenbüttel beheimatete visionär begabte Bibliothekar und Kulturpolitiker manches vorweg, was später andere weiter verfolgen sollten. Die Kontakte in verschiedene Länder Osteuropas hatten sich nach der Wende intensiviert. Seit Ende der 1980er Jahre engagierte sich Paul Raabe für die Franckeschen Stiftungen in Halle an der Saale und wurde zu deren Retter und Erneuerer. Dorthin brachte er seine in Wolfenbüttel gewonnenen Erfahrungen mit und setzte sie erfolgreich um. In Wolfenbüttel in den Ruhestand verabschiedet,

konnte er seine ganze Schaffenskraft von 1992 bis 2000 als Direktor der Franckeschen Stiftungen Halle einsetzen. Inzwischen steht dieses Musterbeispiel pietistisch-pädagogischer Zweckarchitektur auf der deutschen Vorschlagsliste für das Weltkulturerbe. Auch nach seinem Ausscheiden in Halle blieb Paul Raabe ein unverzichtbarer Berater für die Erhaltung des kulturellen Erbes in den neuen Bundesländern. Er verfasste das sogenannte „Blaubuch“ (Paul Raabe: Kulturelle Leuchttürme: Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen ; [ein Blaubuch nationaler Kultureinrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland], Leipzig 2002). Auch beteiligte er sich bis zuletzt an zahlreichen editorischen und allgemeinen geisteswissenschaftlichen Projekten.

Paul Raabe erhielt zahlreiche Ehrungen und Auszeichnungen. Er war Träger des Großen Bundesverdienstkreuzes mit Stern und der Leibniz-Medaille der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Sein Name wird mit vielen Orten seines Wirkens verbunden bleiben, insbesondere mit Halle an der Saale, vor allem aber mit Wolfenbüttel, dessen Bibliotheca illustris er zu einer Gelehrtenrepublik werden ließ, die zu einem lebendigen internationalen Zentrum der Geistes- und Kulturwissenschaften wurde. Neben seinen Erfolgen als Organisator und Projektmacher ist er immer wieder als erfolgreicher Autor an die Öffentlichkeit getreten, darunter mit Werken zur Buch- und Bibliotheksgeschichte, zur Literatur der Weimarer Klassik, zu Aufklärung und Expressionismus. Titel wie „Bücherlust und Lesefreuden. Beiträge zur Geschichte des Buchwesens im 18. und frühen 19. Jahrhundert“ (1984), „Mein expressionistisches Jahrzehnt. Anfänge in Marbach am Neckar“ (2004) und „Frühe Bücherjahre: Erinnerungen“ (2007) waren ebenso kennzeichnend wie seine „Spaziergänge“ durch Goethes Weimar, durch Lessings Wolfenbüttel oder durch Nietzsches Sils-Maria. Immer wieder hat er sich insbesondere in bibliothekspolitischen Fragen zu Wort gemeldet und war so über Jahrzehnte eine der wichtigsten kulturpolitischen Stimmen in Deutschland.

Helwig Schmidt-Glintzer

Zuwahlen

Zum ordentlichen Mitglied wurde am 12.04.2013 gewählt:

in der Klasse für Ingenieurwissenschaften

Fisch, Manfred Norbert, Prof. Dr.-Ing., Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig.

Zu ordentlichen Mitgliedern wurden am 13.12.2013 gewählt:

in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

Matthies, Hermann G., Prof. Ph. D., Institut für Wissenschaftliches Rechnen, TU Braunschweig.

in der Klasse für Ingenieurwissenschaften

Neuweiler, Insa, Prof. Dr. rer. nat., Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik, Leibniz Universität Hannover.

